

Filière Systèmes industriels

Orientation Power & Control

Diplôme 2015

Mathieu Grange

*Optimisation et mesure d'une micro-turbine
hydraulique*

■ Professeur
Samuel Chevailler


■ Expert
Yves Pannatier

■ Date de la remise du rapport
10.07.2015



<input checked="" type="checkbox"/> FSI <input type="checkbox"/> FTV	Année académique / Studienjahr 2014/15	No TD / Nr. DA pc/2015/33
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student Mathieu Grange Professeurs / Dozenten Samuel Chevailler	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes)	

Titre / Titel <p style="text-align: center;">Optimisation et mesure d'une micro-turbine hydraulique</p>
Description / Beschreibung <p>Dans le cadre du développement d'une micro-turbine à roues contra-rotatives, un générateur synchrone monté à l'intérieur d'une conduite a été dimensionné. Le but de ce travail est de caractériser les performances de la machine avec des outils de mesure précis, de proposer des solutions d'amélioration pour accroître la précision des mesures de puissance et de couple. Cette étude sera complétée par une modélisation du système avec un logiciel dédié.</p>
Objectifs / Ziele <ul style="list-style-type: none"> — Caractériser l'installation complète en vue de sa modélisation. — Modéliser une partie de l'installation avec le logiciel SIMSEN. — Améliorer le processus de mesure de puissance et de rendement.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation Leiter der Vertiefungsrichtung:  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 11.05.2015 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 10.07.2015, 12:00 Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: 26 – 28.08.2015 Défense orale / Mündliche Verfechtung: Semaine Woche 36
---	--

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.

Optimisation et mesure d'une micro-turbine

Diplômant

Mathieu Grange

Objectif du projet

L'objectif est de caractériser les performances d'une micro-turbine à roues contra-rotatives avec des outils de mesures précis, d'améliorer son processus de mesures et de modéliser une partie de l'installation sur un logiciel dédié.

Méthodes | Expériences | Résultats

La micro-turbine est composée de deux génératrices insérées à l'intérieur d'une conduite. Dans un premier temps, l'une d'elle a été démontée pour être testée indépendamment. La conception d'un accouplement mécanique a permis de réaliser les tests hors de l'eau. Ses caractéristiques électriques ont ainsi pu être déterminées.

Par la suite, les performances de la micro-turbine ont été mesurées sur le banc de test hydraulique de la HES-SO. Des instruments de mesures précis ont été installés pour enregistrer et tracer les puissances électriques et mécaniques. Celles-ci ont servi de base pour la modélisation numérique.

Pour finir, la partie électrique des génératrices et de ses convertisseurs ont été modélisés à l'aide du logiciel SIMSEN. La micro-turbine a été décomposée en cinq parties, validées séparément, puis regroupées dans un seul modèle. De plus, la caractéristique hydraulique en fonction du débit et de la vitesse a été liée au modèle à l'aide d'une fonction délivrant le couple mécanique.

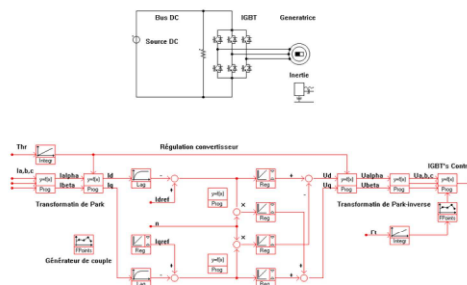
En parallèle, une analyse des signaux électriques a permis de déterminer la source des perturbations de mesures et une solution de filtrage améliorant la qualité des signaux a été installée.

Travail de diplôme
| édition 2015 |

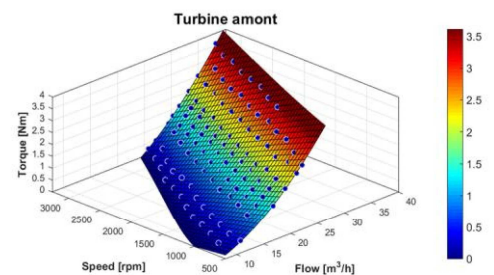
Filière
Systèmes industriels

Domaine d'application
Power and Control

Professeur responsable
Samuel Chevailler
Samuel.chevailler@hevs.ch



Modèle Simsen du convertisseur AC/DC avec sa régulation.



Mesure et extrapolation du couple disponible en fonction du débit et de la vitesse de rotation.

Contenu

1. Contexte du projet	5
2. Objectifs et cahier des charges	6
3. Caractérisation des génératrices	7
3.1 Conception du banc de test	7
3.1.1 Description	7
3.1.2 Conception de l'accouplement	8
3.1.3 Choix des roulements et de l'accouplement	10
3.2 Mesures des performances des génératrices	11
3.2.1 Grandeur générale	11
3.2.2 Mesure de la constante de tension induite	12
3.2.3 Mesures de la forme de la tension induite	13
3.2.4 Rendement de la génératrice	14
3.2.5 Mesure de la constante de couple	16
3.2.6 Comparatif de la modélisation, des mesures et des essais sur le banc de test électrique	17
4. Campagne de mesures sur le banc de test hydraulique	18
4.1 Introduction	18
4.2 Mesures de la puissance mécanique	19
4.3 Mesures des génératrices	22
4.4 Mesures des convertisseurs	23
4.5 Mesures des convertisseurs SP 1403	24
4.6 Mesures du convertisseur SP 1406	25
4.7 Rendement électrique théorique et réel des trois convertisseurs	27
5. Modélisation sur un logiciel dédié (Simsen)	28
5.1 Introduction	28
5.2 Modélisation de la génératrice	28
5.3 Modélisations des inerties	32
5.4 Représentation des grandeurs par les phaseurs spatiaux	34
5.5 Régulation du convertisseur de la génératrice (SP 1403)	37
5.6 Régulation du convertisseur connecté au réseau (SP 1406)	42
5.7 Modélisation générale	46

6. Amélioration du système de mesure.....	50
6.1 Introduction	50
6.2 Analyse des signaux.....	50
6.3 Essai de filtrage	52
6.4 Dédution et choix de commande	54
6.5 Installation des nouveaux filtres	54
6.6 Tests	55
7. Conclusion.....	58
8. Remerciements	59
9. Signature et date.....	59
10. Référence.....	60
11. Table des annexes	60

Table des illustrations

Figure 1: Montage du banc de test électrique.....	7
Figure 2: μ _turbine démontée.....	8
Figure 3: Palier avec roulements.....	9
Figure 4: Assemblage sur Inventor.....	10
Figure 5: Assemblage usiné.....	10
Figure 6: Rotex GS KTR.....	10
Figure 7: Module Getis 290.....	11
Figure 8: Flasque d'adaptation.....	11
Figure 9: Schéma montrant une mesure lors d'un entraînement à vide.....	12
Figure 10: Mesures de la constante de tension induite et de son approximation.....	12
Figure 11: Schéma de mesure de la tension induite.....	13
Figure 12: Mesures de déphasage à 1000 rpm.....	13
Figure 13: Mesures V_{rms} à 1000 rpm.....	13
Figure 14: Tension induite de phase et de ligne à 3500 rpm.....	14
Figure 15: FFT à 1000 rpm.....	14
Figure 16: Schéma de mesure du rendement de la génératrice.....	14
Figure 17: Convertisseurs.....	15
Figure 18: Exemple d'une mesure du rendement de la génératrice.....	15
Figure 19: Rendement de la génératrice.....	16
Figure 20: Mesure de puissance avec le Zimmer.....	18
Figure 21: Turbine amont, débit, vitesse, couple.....	20
Figure 22: Turbine aval, débit, vitesse, couple.....	20
Figure 23: Erreurs relatives de la turbine amont.....	21
Figure 24: Erreurs relatives de la turbine aval.....	21
Figure 25: Courbe de rendement de la génératrice amont 3D.....	22
Figure 26: Courbe de rendement de la génératrice aval 3D.....	22
Figure 27: Courbe de rendement de la génératrice amont 2D.....	22
Figure 28: Courbe de rendement de la génératrice aval 2D.....	22
Figure 29: Schéma de principe des convertisseurs SP.....	23
Figure 30: Courbe de rendement du convertisseur amont 2D.....	24
Figure 31: Courbe de rendement du convertisseur aval 2D.....	24
Figure 32: Courbe des pertes du convertisseur amont 2D.....	25
Figure 33: Courbe des pertes du convertisseur aval 2D.....	25
Figure 34: Courbe du rendement du convertisseur réseau.....	26
Figure 35: Courbe des pertes du convertisseur réseau.....	26
Figure 36: Courbe de rendement de conversion global.....	27
Figure 37: Circuit triphasé.....	29
Figure 38: Schéma équivalent simplifié du moteur synchrone.....	29
Figure 39: Schémas des vecteurs avec une charge résistive.....	30
Figure 40: Modèle de la génératrice branchée à une charge résistive.....	31
Figure 41: Simulation de la génératrice sur différentes charges ohmiques.....	31
Figure 42: Inerties de la μ _turbine.....	32
Figure 43: Modèle de l'inertie.....	33
Figure 44: Simulation de la chaîne d'inerties et de l'inertie équivalente.....	34
Figure 45: Transformation de Park pour un signal sinusoïdal et un carré. [4].....	35
Figure 46: Transformation de Park.....	36
Figure 47: Simulation de la transformation de Park.....	37

Figure 48: Schéma de principe du réglage du courant statorique par un régulateur PI multivariable. [4]	38
Figure 49: Structure du régulateur PI multivariable	38
Figure 50: Maximisation de couple.....	40
Figure 51: Schéma vectoriel de la génératrice	40
Figure 52: Schéma Simsen de la régulation du convertisseur de la génératrice	41
Figure 53: Simulation de la régulation du convertisseur de la génératrice	41
Figure 54: Régulateur PI du courant	43
Figure 55: Recherche des coefficients T_u et T_g	43
Figure 56: Modèle de la régulation du convertisseur de réseau	44
Figure 57: Simulation de la régulation du convertisseur de réseau	45
Figure 58: Modèle global de la μ_{turbine}	47
Figure 59: Simulation global de la μ_{turbine} (3250 [rpm], 28.3 [m ³ /h])	48
Figure 60: Simulation global de la μ_{turbine} , visualisation du courant et de la tension dans la génératrice	49
Figure 61: Simulation global de la μ_{turbine} , visualisation du courant et de la tension sur le réseau	49
Figure 62: Mesure couple, convertisseurs OFF/ convertisseurs ON.....	50
Figure 63: Signal de mesure du couplemètre testé sur le banc de test électrique. Convertisseurs OFF / Convertisseurs ON.....	51
Figure 64: Mesure du courant en mode commun	51
Figure 65: Schéma des terres et des blindages manquants	52
Figure 66: Mesure avec les terres et les blindages raccordés	52
Figure 67: Mesure du couple au laboratoire électrique, filtre déclenché puis enclenché.....	53
Figure 68: Mesure avec le filtre 6137-6.....	54
Figure 69: Câblage des filtres RD 61-37-10.....	55
Figure 70: Mesure sans blindage du bus DC.....	55
Figure 71: Mesure avec blindage du bus DC	56
Figure 72: Mesure avec filtres et blindage du bus DC.....	56
Figure 73: Mesure thermique des filtres	57
Figure 74: Mesure thermique de l'armoire	57

1. Contexte du projet

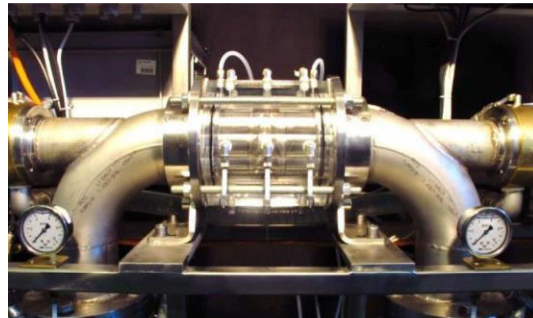
Dans l'évolution énergétique actuelle, la stratégie de l'OFEN ainsi que la sortie programmée du nucléaire tablent sur une augmentation de 4% de la part hydraulique dans le mix énergétique suisse d'ici 2035. Des études récentes basées sur les prévisions de l'OFEN montrent qu'avec la conjoncture, la quasi-totalité des projets de grandes centrales hydrauliques prévus en Suisse ne serait pas viable financièrement [1].

Le potentiel de production d'énergie par de nouvelles grosses installations hydrauliques étant restreint, le but serait de profiter de l'attractivité qu'offre la RPC pour les centrales inférieures à 10 [MW] en implantant des micro-turbines sur des conduites d'eau potable déjà existantes. Cette solution offrirait l'avantage de réduire de manière optimale les coûts liés aux travaux d'excavation et de chaudronnerie.

La micro-turbine étudiée est constituée de deux roues contrarotatives coaxiales montées à l'intérieur de la conduite. Elle permet de valoriser l'énergie détruite dans les réducteurs de pression utilisés actuellement sur les réseaux d'eau potable.

Plusieurs prototypes sont en cours d'étude et de développement :

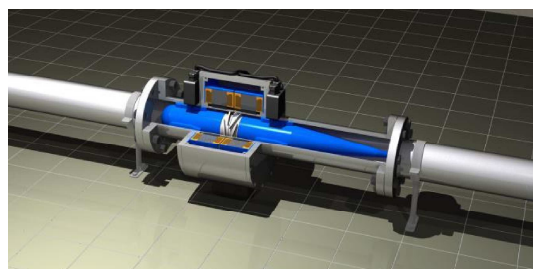
Elbowed-pipe, EPFL



Bulbe



Straflo



Les deux derniers prototypes offrent l'avantage de pouvoir être implémentés directement sur une conduite existante. Une μ _turbine de type bulbe a été développée par la HES-SO entre 2012 et 2014 [2]. Ce modèle souffre de problèmes de précision de mesures. Des perturbations électromagnétiques faussent la valeur du couple mesurée et les valeurs de puissance indiquées par les convertisseurs ne correspondent pas à la réalité. Dans une moindre mesure, toute l'installation est affectée par ces « bruits » de mesures.

2. Objectifs et cahier des charges

Le but de ce travail est de caractériser les performances de la machine avec des outils de mesure précis et de proposer des solutions d'amélioration pour accroître la précision des mesures de puissance et de couple. Une modélisation du système avec un logiciel dédié complètera cette étude.

Objectif du travail de diplôme :

- Caractériser l'installation complète en vue de sa modélisation
- Modéliser une partie de l'installation avec le logiciel SIMSEN
- Améliorer le processus de mesure de puissance

Pendant le travail de semestre, les points suivants ont été traités :

- Mesurer les performances des génératrices.
- Établir un schéma-bloc de l'installation hydraulique dans son ensemble.
- Établir une liste des points critiques de l'installation.

3. Caractérisation des génératrices

3.1 Conception du banc de test

Les essais pour caractériser les grandeurs physiques des génératrices ont été réalisés sur un banc de test adapté et sans eau. Ce chapitre présente les étapes qui ont été nécessaires pour adapter la génératrice au banc de test. Après l'assemblage des composants réalisés, le banc de test électrique ci-dessous a pu être monté.

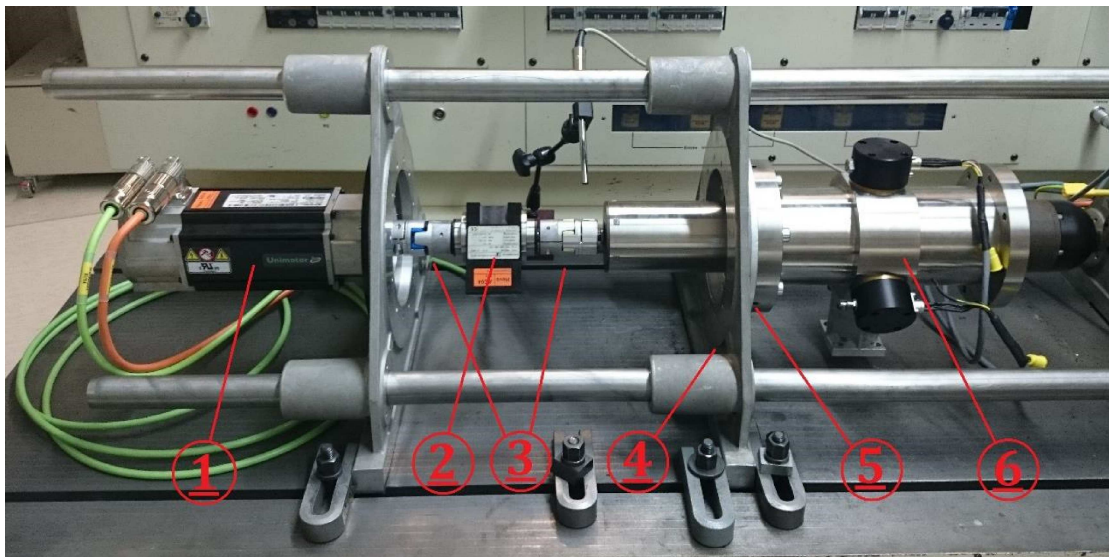


Figure 1: Montage du banc de test électrique

- 1) Moteur AC Brushless Emerson unimotor fm 1.23 [KW]
- 2) Couplemètre Magtrol TMB 208 20 [Nm]
- 3) Accouplement KTR Rotex GS
- 4) Module Getis 290
- 5) Flasque d'adaptation
- 6) μ _turbine bulbe partie amont

3.1.1 Description

Le choix a été fait de tester une seule génératrice, car les premières mesures ont montré un comportement semblable sur les deux génératrices du prototype. La génératrice amont devait être démontée pour réaliser des mesures d'usure sur les paliers céramiques et a donc été choisie pour faire les tests.



Figure 2: μ _turbine démontée

La turbine étant construite avec des paliers hydrodynamiques, un nouvel accouplement a dû être conçu pour pouvoir la tester hors de l'eau.

3.1.2 Conception de l'accouplement

La conception a été faite avec le logiciel de CAO Inventor 2015 en se basant sur la conception déjà modélisée. Seuls les assemblages principaux sont exposés ici. Les plans détaillés sont en (Annexe 1).

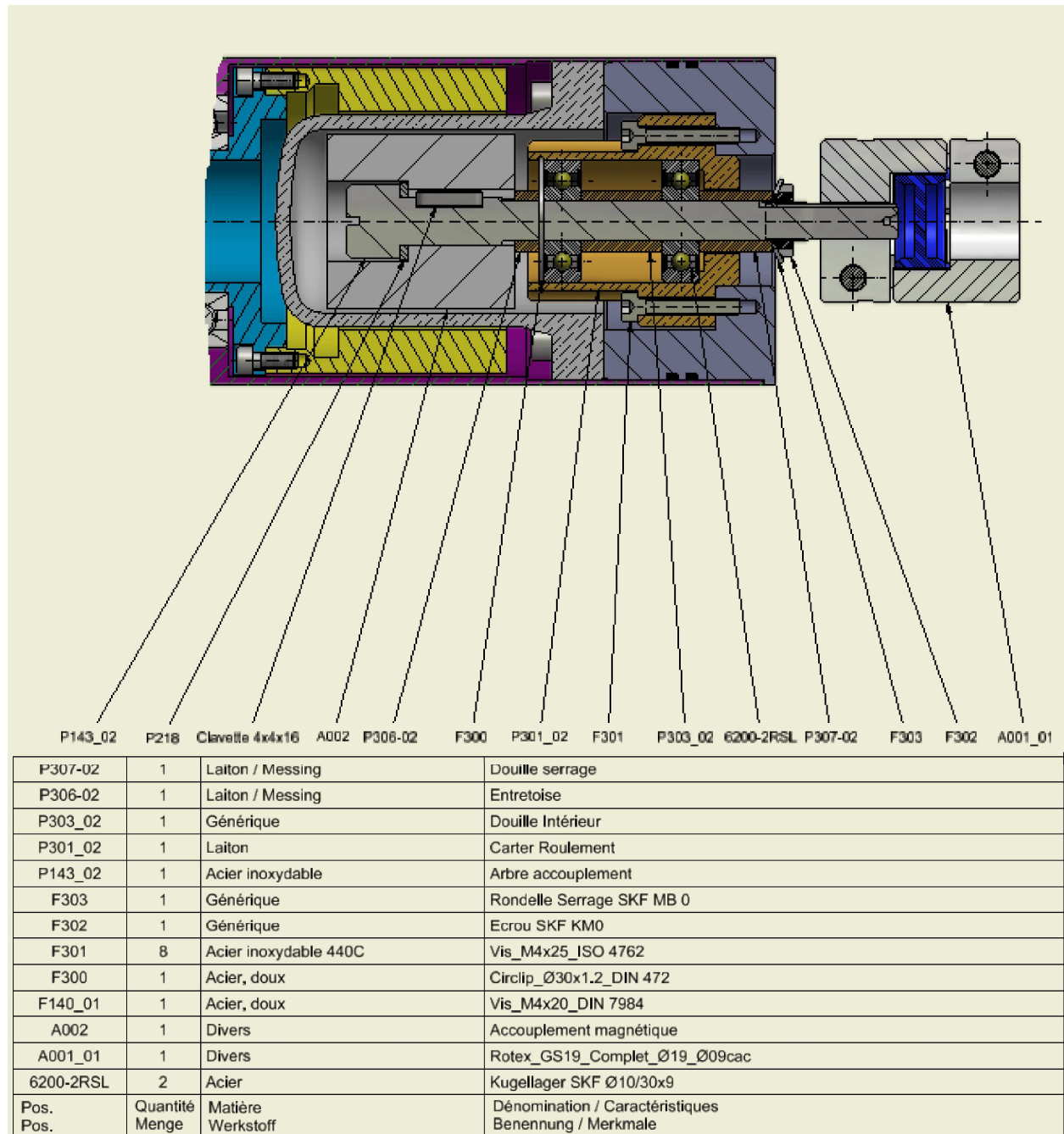


Figure 3: Palier avec roulements

Le palier a donc été conçu pour s'adapter à la conception déjà existante. Il est composé d'un carter qui entoure deux roulements montés en X. L'accouplement magnétique (A002) est rendu solidaire au palier par l'intermédiaire de trois douilles (P303, P306, P307) serrées grâce à un écrou SKF (F302) monté sur l'arbre.

Les pièces ont été réalisées par l'atelier d'usinage de la HES-SO. Sur les figures suivantes, l'assemblage dessiné sur Inventor et les pièces usinées sont visibles.

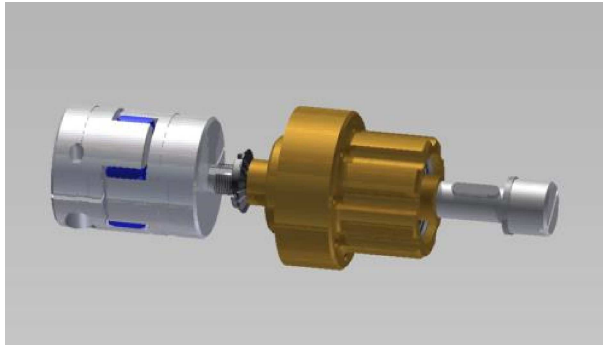


Figure 4: Assemblage sur Inventor



Figure 5: Assemblage usiné

3.1.3 Choix des roulements et de l'accouplement

Dans notre cas, le prototype est entraîné par un moteur et pratiquement aucune force axiale n'intervient. Les roulements ont donc été dimensionnés uniquement pour une charge radiale. Le choix s'est porté sur des 6200 2RS à gorge profonde qui offrent une durée de vie largement supérieure à la durée des tests effectués (deux ans à vitesse nominale calculée avec le logiciel SKF).

La μ _turbine est montée sur le banc accouplée à un moteur synchrone à aimants permanents qui permet de la faire fonctionner en génératrice ou en moteur. L'accouplement entre les deux machines est réalisé à l'aide d'un ROTEX GS de chez KTR.aim



Figure 6: Rotex GS KTR

Le choix s'est porté sur le modèle (Rotex GS 19 compact 92 Sh-A 2.8-Ø9 2.9-Ø19) qui offre un couple de transmission par friction de 25 [Nm]. Son anneau élastique 92 Sh-A peut transmettre 10 [Nm] et possède une très bonne absorption des vibrations et des défauts d'alignement.

Une flasque a été réalisée pour permettre de monter la μ _turbine sur les modules triangulaires de laboratoire Getis 290.

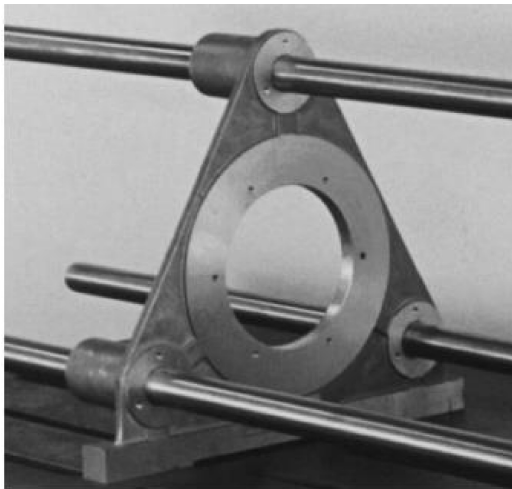


Figure 7: Module Getis 290

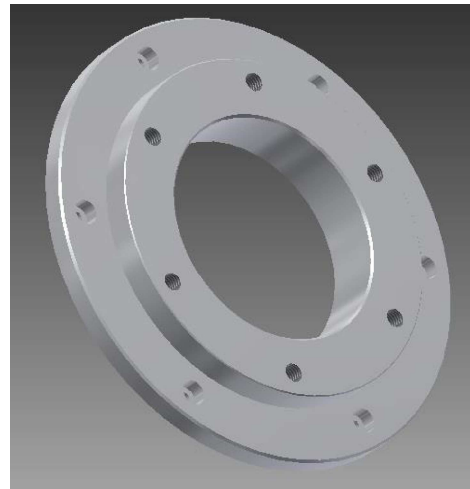


Figure 8: Flasque d'adaptation

3.2 Mesures des performances des génératrices

Toutes ces mesures ont été effectuées au laboratoire électrique. Les datasheets sont tirés du rapport « Dimensionnement des génératrices » de David Melly [3].

3.2.1 Grandeur générale

Machine synchrone :

Mechanical input power	1.3	[kW]
Electrical output power	1.2	[kW]
Torque	3.6	[Nm]
Speed max	3500	[rpm]
Number of pole pairs	2	[-]
RMS ligne voltage	430	[V _l]
RMS Line Current	1.8	[A]
Torque constant	2.05	[Nm/A _{rms}]
Back EMF constant line voltage K_{EMF}	1.18	[V _{rms} /(rad/s)]

3.2.2 Mesure de la constante de tension induite

La détermination de la constante K_{EMF} a été réalisée par la mesure de la tension induite entre phases, en sortie de génératrice lors d'un entraînement à vide, voir Figure 9. La vitesse a été variée de 0 à 3500 [rpm] à l'aide d'un moteur Emerson Unimotor AC Brushless piloté par un variateur EMERSON Unidrive M700. La tension ainsi que la fréquence ont été relevées avec un multimètre de type Metrahit.

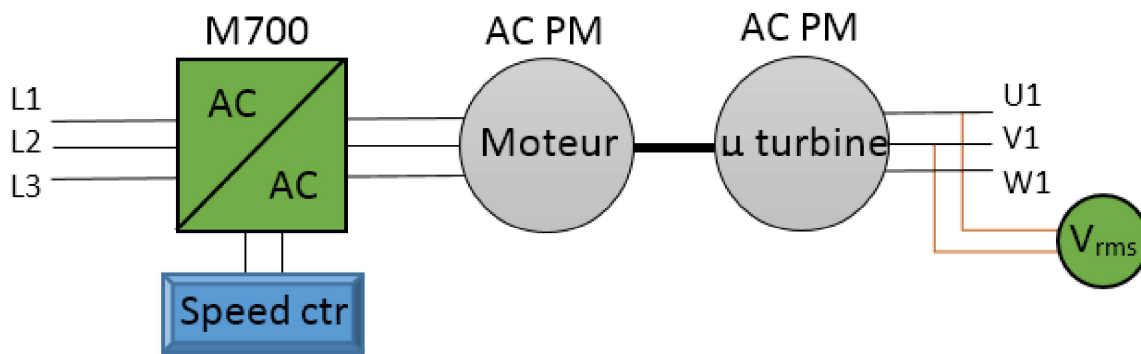


Figure 9: Schéma montrant une mesure lors d'un entraînement à vide

Calcul

$$K_{EMF} = \frac{U_{rms\ phases}[V]}{\Omega_{rotor} \left[\frac{rad}{s} \right]} = \left[\frac{V}{(rad/s)} \right] \quad (1)$$

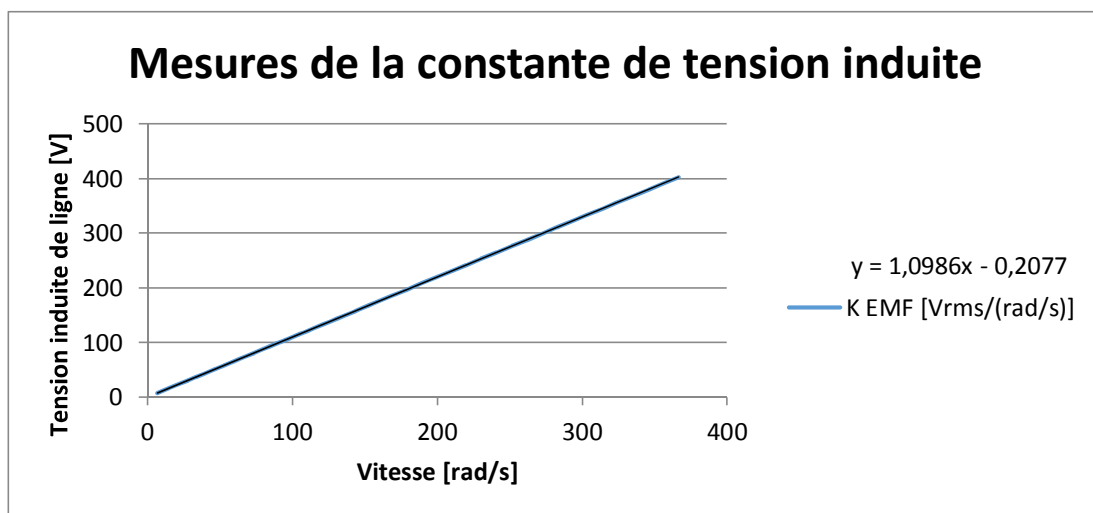


Figure 10: Mesures de la constante de tension induite et de son approximation

La mesure de la tension induite donne une constante de 1.0986 [V_{rms}/(rad/s)]. On peut constater la très bonne linéarité de la tension induite due au rotor à aimants permanents.

3.2.3 Mesures de la forme de la tension induite

Le but de cette mesure est de vérifier la bonne symétrie des phases, le déphasage entre elles ainsi que la forme de la tension induite.

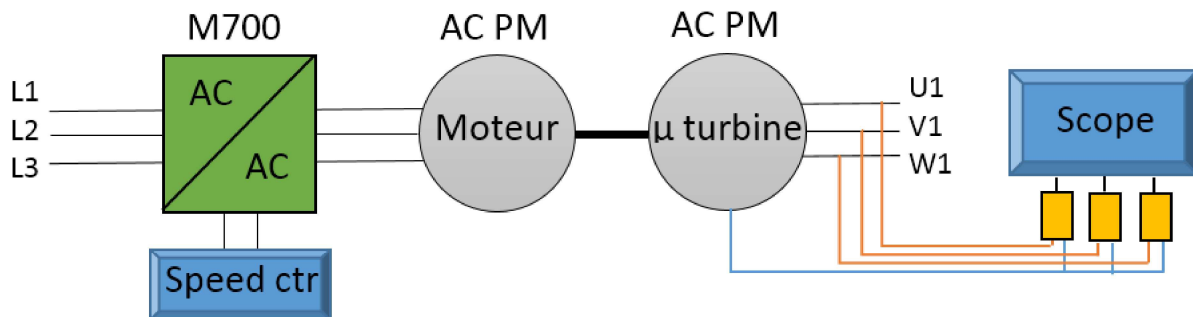


Figure 11: Schéma de mesure de la tension induite

La mesure a été réalisée en sortant le point milieu de la machine. Les tensions des trois phases ont été mesurées à l'aide de l'oscilloscope Tektronix TDS 2014 et de sondes différentielles.

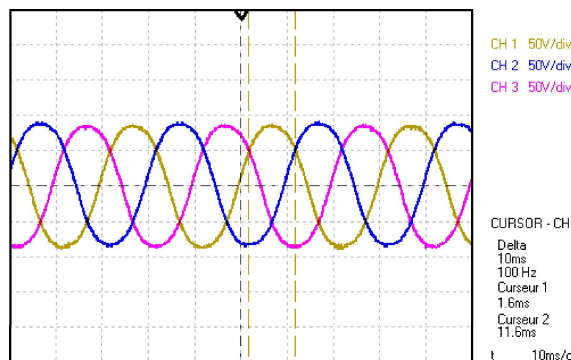


Figure 12: Mesures de déphasage à 1000 rpm

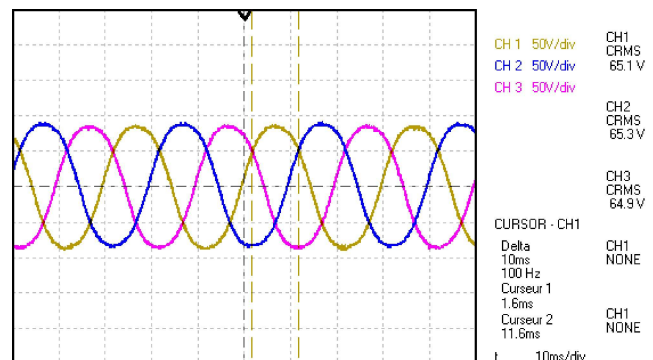


Figure 13: Mesures V_{rms} à 1000 rpm

Sur la Figure 12, l'ordre des phases ainsi que leur déphasage ont pu être vérifiés. On peut relever sur la Figure 13, la tension rms de la phase U1 qui vaut 65.1 [V] à 1000 [rpm].

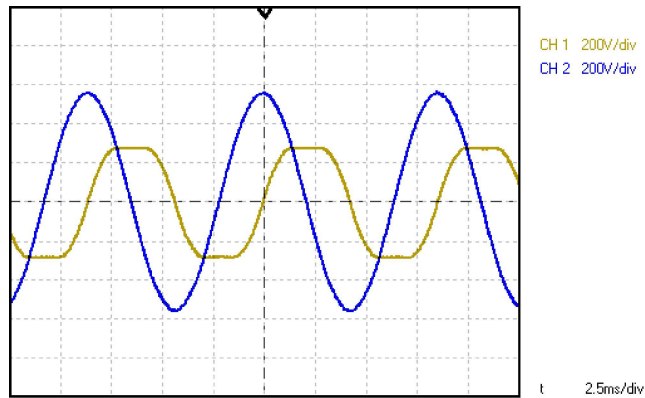


Figure 14: Tension induite de phase et de ligne à 3500 rpm

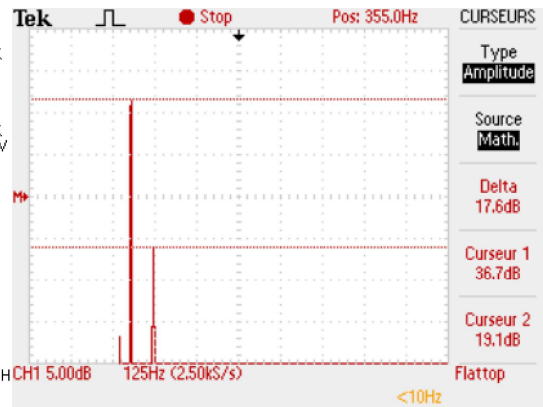


Figure 15: FFT à 1000 rpm

Sur la FFT de la Figure 15, on peut visualiser la fondamentale de la tension induite de phase qui vaut 68.4 [V] et l'harmonique de rang 3 qui vaut 9 [V]. On remarque l'influence de cette harmonique sur la tension de phase (CH1) de la Figure 14 qui est fortement écrêtée. On peut aussi noter que les harmoniques de rang plus élevées sont très faibles et presque pas visibles.

3.2.4 Rendement de la génératrice

Les mesures ont été effectuées sur le banc de test électrique avec la μ _turbine accouplée à un moteur synchrone à aimants permanents.

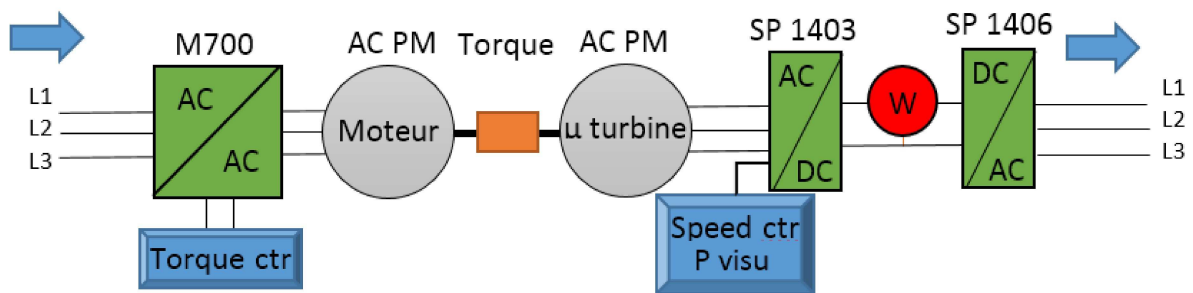


Figure 16: Schéma de mesure du rendement de la génératrice

Matériel utilisé :

- M700 Variateur Emerson Unidrive M700-034
- AC PM Moteur Emerson Unimotor fm AC brushless moteur
- Torque Couplemètre Magtrol TMB 208 20 [Nm]
- AC PM μ _turbine bulb
- SP1403 Variateur Emerson Unidrive SP 1403
- W Wattmètre Unigor 390 LEM
- SP1406 Variateur Emerson Unidrive SP 1406 (Regen)

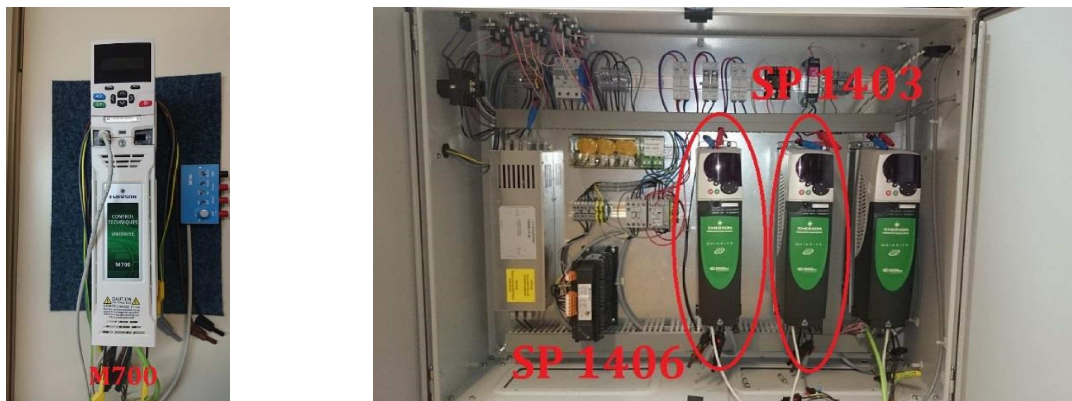


Figure 17: Convertisseurs

Toutes les mesures ont été prises en demandant des vitesses constantes au variateur SP1403 et en fournissant un couple variable en entrée de la génératrice grâce au convertisseur M700. La puissance transmise à la μ _turbine est visualisée grâce au couplemètre Magtrol TMB et à la vitesse de rotation de l'arbre.

Dans ces essais, les frottements et le couple résistant des roulements sont pris en compte, contrairement aux mesures effectuées par David Melly [3], qui a mesuré les performances du générateur seul (hors du bulbe).

Mesures du rendement de la génératrice

Le rendement a été calculé avec les mesures de tension et de courant affichées par le convertisseur SP1 et la puissance mécanique introduite sur l'arbre de la μ _turbine.

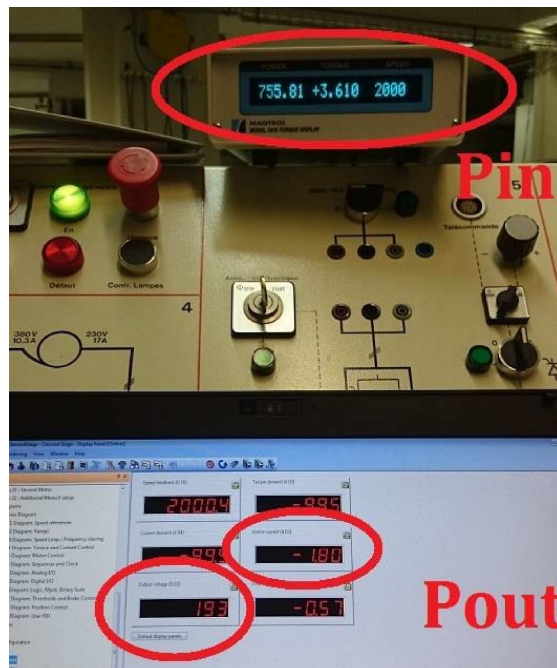


Figure 18: Exemple d'une mesure du rendement de la génératrice

Calcul

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{mec}} = \frac{\Omega_{in} \cdot M_{in}}{U_{out} \cdot I_{out}} = [-]$$

La mesure du rendement en fonction du couple d'entrée a été prise pour différentes vitesses de rotation.

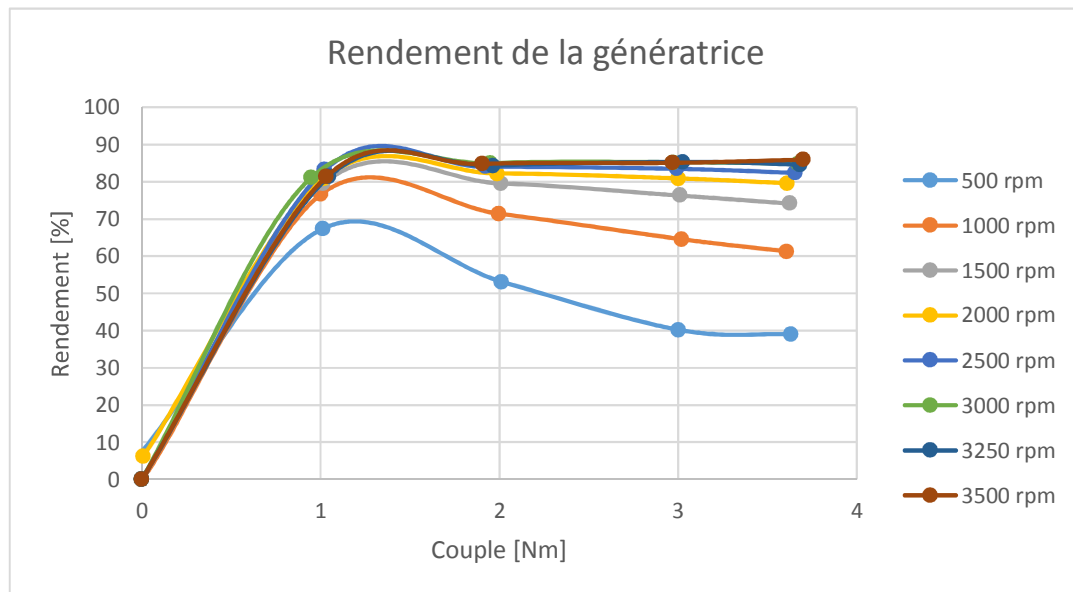


Figure 19: Rendement de la génératrice

On peut observer que le rendement de la génératrice maximal est proche de 90 %. Cela correspond au rendement mesuré par David Melly [3].

3.2.5 Mesure de la constante de couple

La mesure de la constante de couple K_T a été effectuée en même temps que les mesures de rendements présentées précédemment. Elle a été mesurée au point de fonctionnement nominal de la machine en mode génératrice.

Calcul

$$K_T = \frac{\text{Couple [Nm]}}{\text{Courant}[A_{rms}]} = 2.055 \left[\frac{\text{Nm}}{A_{rms}} \right]$$

3.2.6 Comparatif de la modélisation, des mesures et des essais sur le banc de test électrique

Le tableau suivant résume les différentes valeurs trouvées lors des mesures et des modélisations.

		Modélisation	Mesures sur la génératrice seule (08.2013)	Essais sur le banc de test de la μ -turbine
Résistance Phase at 25°C	[Ω]	12.9	13	13.3
Inductance Phase	[mH]	34	31	29.7
Fundamental induced RMS Line Voltage (3500 rpm)	[V]	430	405	402.5
Back constant EMF line voltage	[$V_{rms}/(rad/s)$]	1.18	1.1	1.099
Constante couple	[Nm/ A_{rms}]	2.05	1.89	2.055
Efficiency	%	92	90	86

On remarque que les valeurs mesurées lors des tests sont proches de celles données dans le datasheet. La valeur du rendement est inférieure à celle attendue. Cela est dû aux frottements, comme expliqué précédemment.

4. Campagne de mesures sur le banc de test hydraulique

4.1 Introduction

Les mesures permettant de caractériser de manière précise la μ turbine avec son armoire électrique ont été réalisées sur le banc de test hydraulique. Le matériel utilisé est le suivant :

Zimmer LMG500 Master	SN : 0350906	W1-W4
Zimmer LMG500 Slave	SN : 02040710	W5-W8
Logiciel LMG Control	Firmware : 4.161	
TI-nspire	Carte : NI9205	
Logiciel LabVIEW	V : 20150519	

L'acquisition se distingue en deux parties :

- Mesure des grandeurs électriques
- Mesure des grandeurs mécaniques et hydrauliques

L'instrument de mesure électrique (Master + Slave) permet d'enregistrer huit sources de puissance en même temps, avec une mesure de tension et de courant pour chaque canal. Le schéma de principe du câblage est présenté ci-dessous et la version détaillée est présentée en (Annexe 2). Le nombre total de canaux étant limité, pour pouvoir réaliser trois mesures de puissance triphasées et deux biphasées en même temps, les trois groupes de mesure de puissance triphasée ont été réalisés selon le montage Aron.

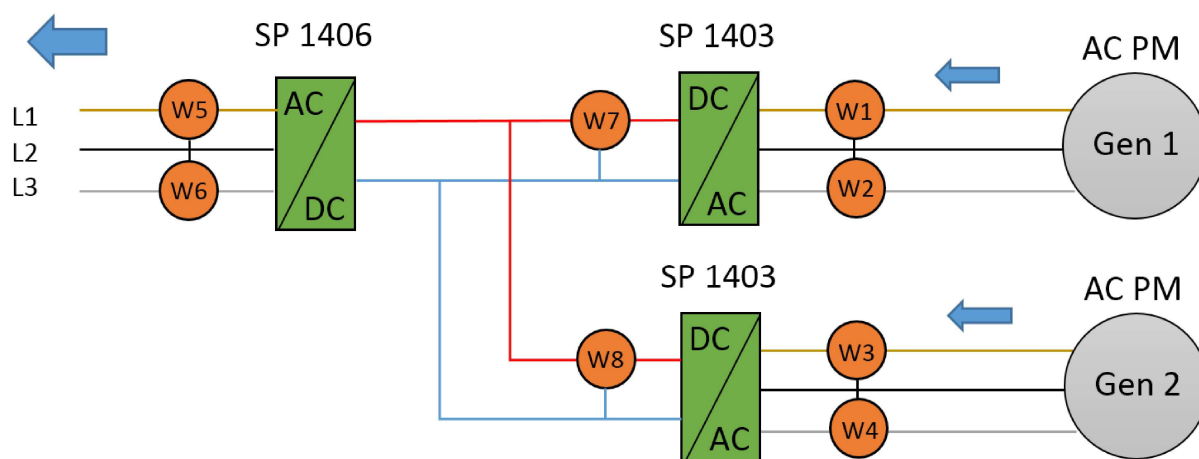


Figure 20: Mesure de puissance avec le Zimmer

Les mesures des grandeurs physiques telles que : débit, chute, pression, vitesse de rotation des roues, couples disponibles etc. ont été enregistrées à l'aide de l'interface LabVIEW.

Il existe donc pour chaque campagne de mesures effectuée deux fichiers au format 'XLS' regroupant toutes les mesures. Celles-ci ont ensuite été regroupées dans un seul tableau sous Matlab pour être post-traitées plus facilement.

Toutes les données mises en forme dans le chapitre 4 sont visibles en format standard en (Annexe 3).

4.2 Mesures de la puissance mécanique

L'objectif est de connaître à tout moment la puissance disponible à l'arbre de chaque génératrice. La campagne de mesures a été effectuée en balayant la plage de débit de la machine pour différentes vitesses de rotation imposées aux génératrices. Le but étant de tracer la caractéristique en mode génératrice, la plage de débit a été choisie en fonction. Le rapport de vitesse de rotation entre les deux génératrices ' α ' peut être varié. Il pourrait donc être intéressant de réaliser les mesures pour des valeurs ' α ' différentes. Cependant, le rapport $\alpha \approx 1$ a été choisi car il correspondait au BEP trouvé dans une campagne de mesures effectuée sur les roues (Annexe 4) de la machine. De plus, la disponibilité du banc de test était limitée. Il faut aussi savoir que ce coefficient n'influence pas directement la partie électrique sur laquelle porte l'étude, mais surtout la partie hydraulique.

Les grandeurs nominales de la partie mécanique lors des tests sont :

Débit	10-40	[m ³ /h]
Couple	0-4	[Nm]
Vitesse	500-3250	[rpm]

Le point de fonctionnement des machines peut être varié en changeant les consignes de vitesse de rotation et de débit. Il en résulte par l'interaction des roues, une variation de couple à l'entrée des génératrices. Sur les deux figures suivantes, les ronds bleus représentent les points de mesures effectuées sur les turbines amont et aval. La surface visible représente une extrapolation entre ces points.

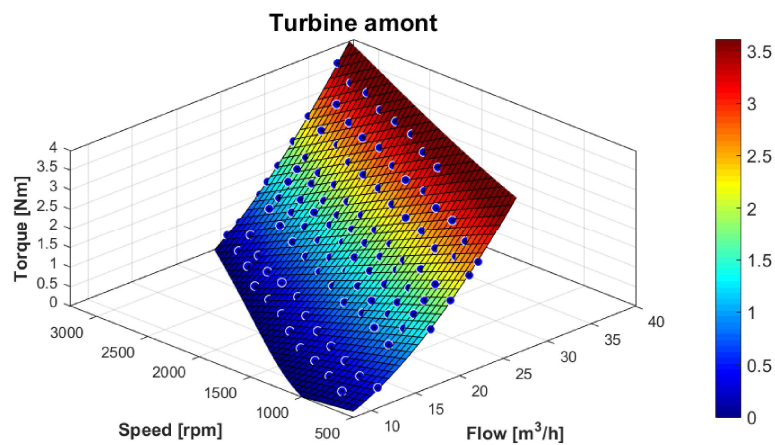


Figure 21: Turbine amont, débit, vitesse, couple

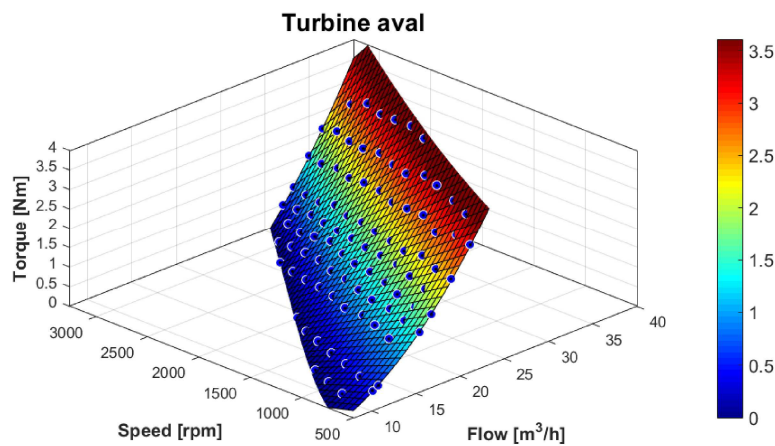


Figure 22: Turbine aval, débit, vitesse, couple

Chaque surface a été créée par une extrapolation polynomiale du troisième ordre à l'aide de la fonction 'polyfit' du logiciel Matlab. Cela permet de visualiser n'importe quel point de fonctionnement, même s'il n'a pas été mesuré. Le but est de connaître les paramètres de cette fonction pour pouvoir l'implémenter dans la simulation numérique au chapitre 5.7. Un calcul d'erreur entre la fonction extrapolée et les mesures effectuées est visible sur les figures suivantes.

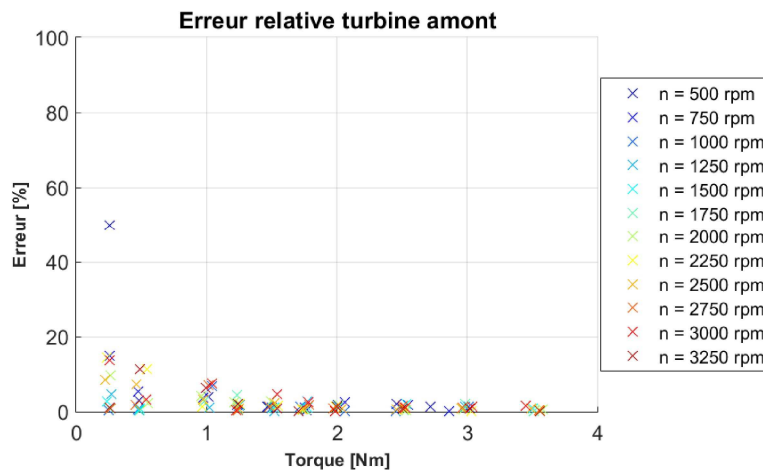


Figure 23: Erreurs relatives de la turbine amont

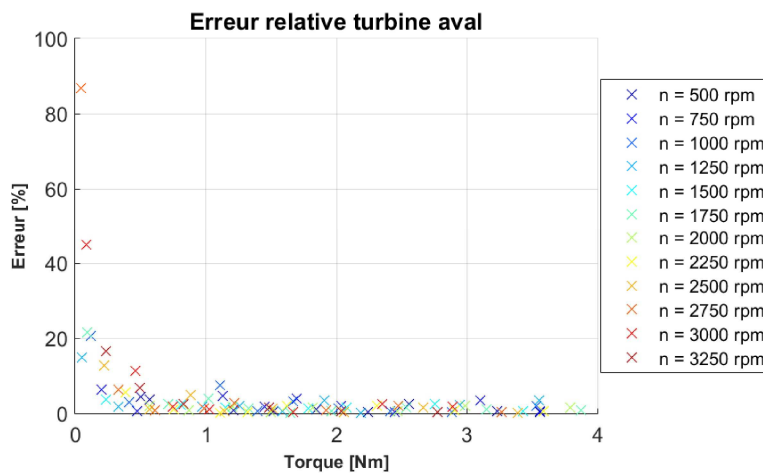


Figure 24: Erreurs relatives de la turbine aval

On peut constater que l'erreur relative entre l'extrapolation et certaines mesures est très grande. Cependant, ces erreurs se situent principalement dans la plage des petits couples, là où la μ_{turbine} varie facilement entre les modes pompe et turbine et où la précision de mesure est la plus mauvaise. Cet écart est donc principalement dû aux erreurs de mesures et non pas à la fonction utilisée. La plage optimale de fonctionnement de la μ_{turbine} est comprise dans un intervalle de 1 [Nm] et 2.5 [Nm]. On constate que l'erreur est faible pour cette plage de fonctionnement. On peut donc en déduire que l'extrapolation est bien représentative de la réalité. On peut considérer sa validité entre 1 et 4 [Nm] et entre 500 et 3250 [rpm].

4.3 Mesures des génératrices

Les caractéristiques de la génératrice amont ont été réalisées au laboratoire de test électrique. Les résultats sont visibles au chapitre 3.2.6. Ils comprennent les mesures de résistance, d'inductance etc. Le but ici est de visualiser la puissance disponible en fonction du couple et de la vitesse de rotation. La puissance mécanique est mesurée grâce à un capteur de couple et un capteur de vitesse. La puissance électrique est mesurée avec un montage Aaron comme on peut le voir sur le schéma de câblage de la Figure 20.

Le couple de la machine est mesuré à l'aide d'un couplemètre de marque NCTE (Annexe 5). Il a été choisi principalement pour son faible encombrement qui s'intégrait parfaitement au prototype de type bulbe. Le couple maximum à mesurer dans la μ -turbine est de 3.6 [Nm]. La vitesse est mesurée grâce à un codeur incrémental de marque IED (Annexe 6).

Sur les figures suivantes, on peut visualiser les courbes de rendement en 3D et 2D des deux machines, en fonction du couple et de la vitesse de rotation.

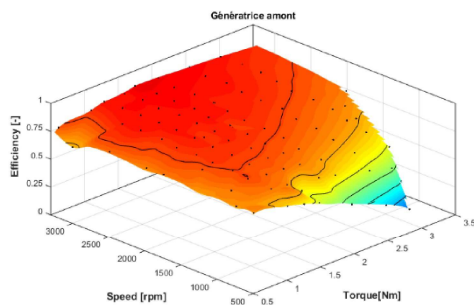


Figure 25: Courbe de rendement de la génératrice amont 3D

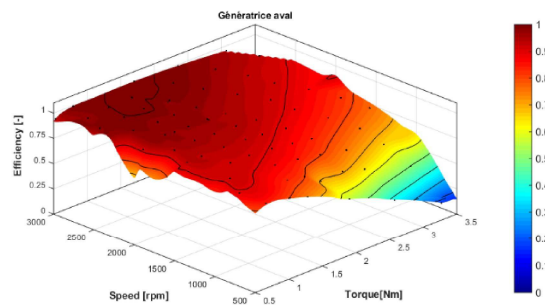


Figure 26: Courbe de rendement de la génératrice aval 3D

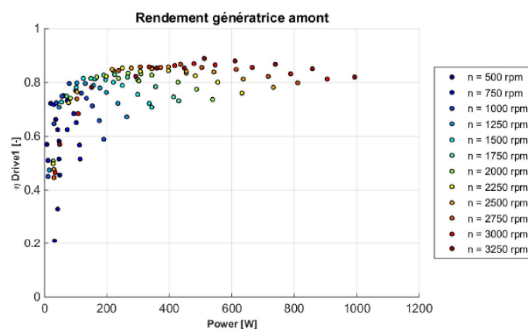


Figure 27: Courbe de rendement de la génératrice amont 2D

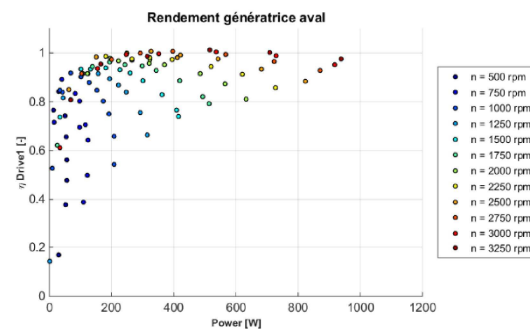


Figure 28: Courbe de rendement de la génératrice aval 2D

On constate une très forte dégradation du rendement pour des petites puissances et des grands couples. Cela s'explique par l'augmentation du rapport entre la chute de tension sur la résistance statorique et la tension induite qui est proportionnelle à la vitesse de rotation.

On constate aussi très nettement que le rendement maximum n'est pas situé à la puissance nominale de la machine. Il se situe plutôt vers 1.5 [Nm], 3000 [rpm]. On constate donc que

les points de fonctionnement optimaux des roues et des génératrices ne sont pas calés au même endroit. Pour augmenter le rendement global, deux solutions pourraient être envisagées : modifier la géométrie des roues ou revoir le dimensionnement des génératrices.

4.4 Mesures des convertisseurs

SP 1403 : Convertisseurs pilotant les génératrices Figure 29.

Puissance nominale (400 V)	1500	[W]
Tension nominale	380-480	[V]
Courant nominal	4.2	[A]
Fréquence commutation	3-16	[kHz]

SP 1406 : Convertisseur transmettant l'énergie du bus DC au réseau Figure 29.

Puissance nominale (400 V)	4000	[W]
Tension nominale	380-480	[V]
Courant nominal	9.5	[A]
Fréquence commutation	3-16	[kHz]

Dans notre cas, les convertisseurs sont réglés avec une fréquence de commutation de 6 [kHz].

L'électronique de puissance des convertisseurs de la gamme SP 1400 est construite en trois parties principales:

- (1) un redresseur triphasé en entrée (pont de diodes) côté réseau
- (2) un bus DC interne (possibilité d'être sorti)
- (3) un onduleur triphasé en sortie (6 IGBT) côté moteur

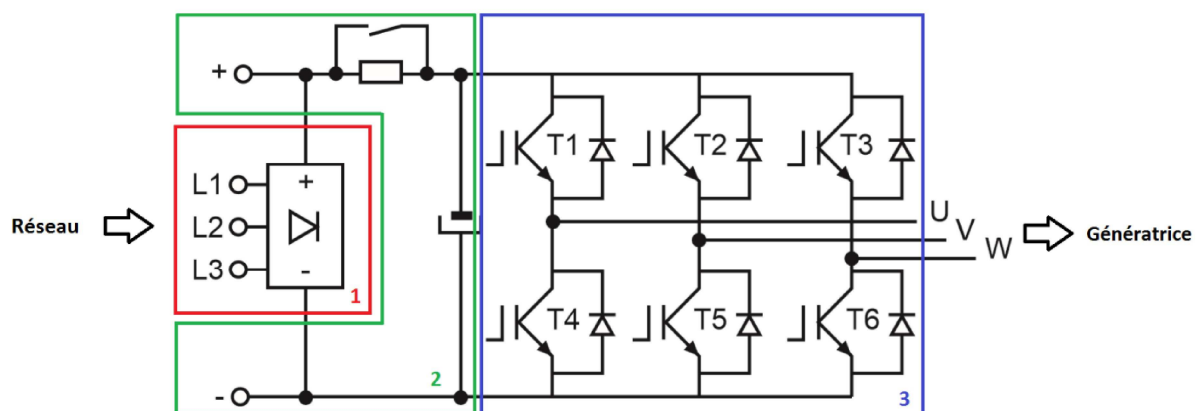


Figure 29: Schéma de principe des convertisseurs SP

Le bus DC du convertisseur peut être relié à une résistance de freinage ou en parallèle à d'autres convertisseurs. L'avantage de cette deuxième solution est de pouvoir récupérer l'énergie du moteur piloté lorsqu'il produit du courant, en l'injectant dans un autre consommateur qui a besoin d'énergie au même moment. Ce système est par exemple utilisé là où plusieurs ascenseurs fonctionnent en même temps. La descente d'un ascenseur peut fournir une partie de l'énergie à un autre qui est en train de monter.

Dans notre cas, le but est non seulement de pouvoir échanger de l'énergie sur le bus DC, mais aussi de réinjecter de l'énergie sur le réseau. Un convertisseur quatre quadrants est nécessaire pour réaliser cette tâche. Cependant, le pont de diodes en entrée des SP 1400 (voir le point un de la Figure 29) fait de ce type de variateur un convertisseur deux quadrants. La solution consiste donc à utiliser un convertisseur de plus qui sert soit à alimenter le bus DC, soit à réinjecter le surplus d'énergie sur le réseau. Le montage ressemble donc à deux demi-ponts montés en inverse pour réaliser un pont complet. Dans ce type de montage, les ponts de diodes en entrée des convertisseurs ne sont tout simplement plus utilisés.

4.5 Mesures des convertisseurs SP 1403

Les convertisseurs ont été mesurés avec un montage de puissance en Aron du côté de la génératrice et un montage de puissance standard sur le bus DC. Voir Figure 20.

L'objectif est de quantifier leurs rendements, leurs pertes et leurs comportements en fonction de la puissance transférée.

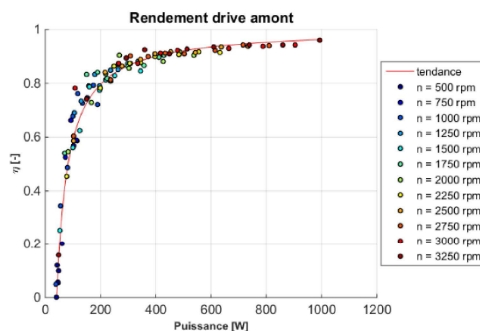


Figure 30: Courbe de rendement du convertisseur amont 2D

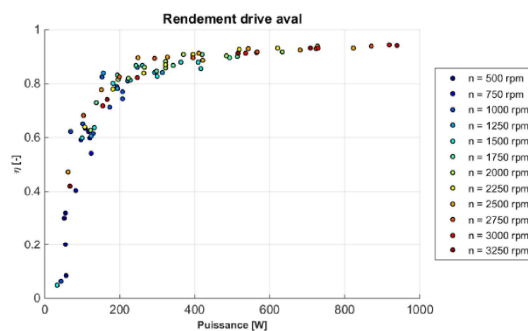


Figure 31: Courbe de rendement du convertisseur aval 2D

Les rendements maximaux atteints avec la u_{turbine} sont de :

Convertisseur Amont	=	96	[-]
Convertisseur Aval	=	94.4	[-]

On peut constater sur les figures précédentes que le rendement augmente en fonction de la puissance. Les meilleurs rendements sont atteints lorsque les vitesses de rotation des génératrices sont les plus élevées. Cela s'explique par la puissance transférée qui augmente avec la vitesse de rotation. Le rendement maximal du convertisseur aval est plus faible car les puissances atteintes sont plus faibles. A puissance égale, les rendements sont très proches.

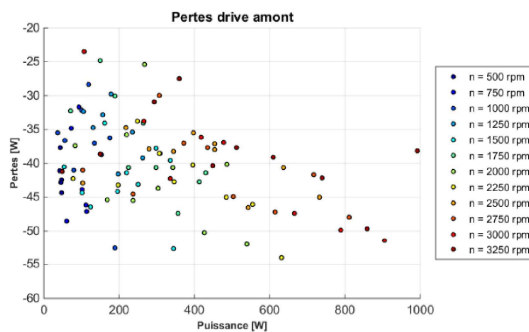


Figure 32: Courbe des pertes du convertisseur amont 2D

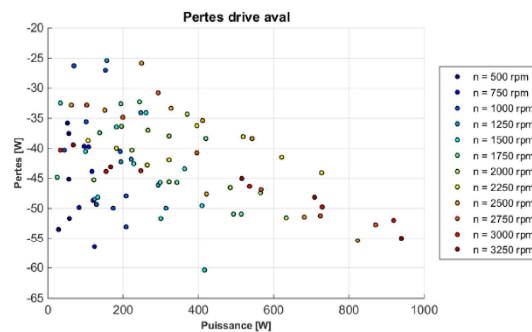


Figure 33: Courbe des pertes du convertisseur aval 2D

Trois types de pertes peuvent être distingués : les pertes statiques correspondant à la consommation propre des convertisseurs, les pertes de conduction ainsi que les pertes de commutations. Ces dernières ne sont pas directement proportionnelles au courant qui circule dans les IGBT. On constate cependant qu'elles augmentent en fonction de la puissance.

Les pertes peuvent être quantifiées ainsi :

Pertes statiques	=	20	[W]
Pertes de commutations	=	15	[W]
Pertes de conductions	=	Environ 2% Pconsomé	[W]

4.6 Mesures du convertisseur SP 1406

Le convertisseur SP 1406 a été mesuré avec un montage Aron côté réseau et un montage de puissance standard sur le bus DC. Lors du processus de démarrage, le pont de diodes précharge le bus DC à environ :

$$U_{DC} = \frac{U_{ph} \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2}}{\pi} = 538 [V] \quad (2)$$

Lorsque la valeur de précharge est atteinte, le pont est découplé du réseau par un contacteur et le réseau est connecté sur le pont d'IGBT. Le schéma de câblage est visible en (Annexe 2).

Sur la Figure 34, on constate à nouveau que le rendement augmente en fonction de la puissance transférée.

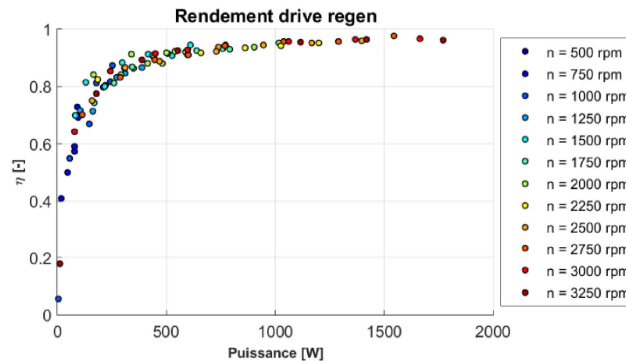


Figure 34: Courbe du rendement du convertisseur réseau

Le rendement maximal atteint est de 97 %.

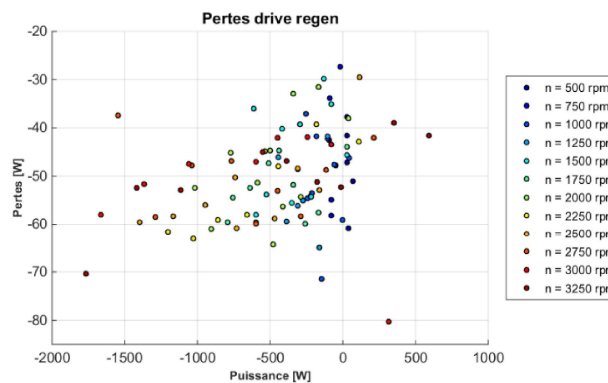


Figure 35: Courbe des pertes du convertisseur réseau

On peut constater que les pertes ne sont pas autant dépendantes de la puissance transférée que pour les convertisseurs SP1403. On constate aussi que le milieu de sa plage de fonctionnement n'est jamais atteint.

Les pertes peuvent être résumées ainsi :

Pertes statiques	=	20	[W]
Pertes commutation	=	25	[W]
Pertes conduction	=	Environ 1.5% Pconsommé	[W]

4.7 Rendement électrique théorique et réel des trois convertisseurs

En se basant sur les chiffres annoncés par le fabricant pour une fréquence de 6 [KHz], le rendement de conversion théorique global à pleine charge serait de :

$$\eta_{sp1403} = \frac{1500 - 52}{1500} \cdot 100 = 96.53 \text{ [\%]} \quad (3)$$

$$\eta_{sp1406} = \frac{4000 - 123}{4000} \cdot 100 = 96.93 \text{ [\%]} \quad (4)$$

Le rendement de conversion entre la puissance électrique générée par la micro-turbine et celle injectée sur le réseau pourrait être calculé par la multiplication des deux rendements théoriques. Dans le cas où les pertes dans le bus DC (2.5 [W]) et dans la self de réglage seraient négligées, le rendement de conversion serait de 93.6 [%].

Le rendement maximum mesuré devrait correspondre au rendement calculé. Cependant les puissances nominales ne sont pas atteintes et le rendement total en est donc affecté.

En pratique le rendement global des convertisseurs mesuré est le suivant :

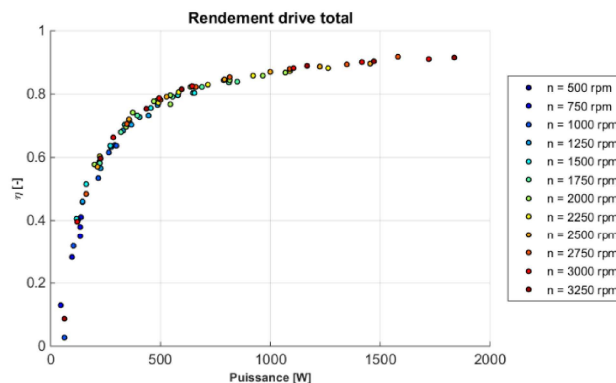


Figure 36: Courbe de rendement de conversion global

Le rendement de conversion maximal constaté est donc de 91.8 %. On peut facilement extrapoler que le rendement maximal sera atteint pour la puissance nominale du convertisseur.

5. Modélisation sur un logiciel dédié (Simsen)

5.1 Introduction



Le logiciel Simsen a été utilisé pour modéliser la partie électrique de la μ _turbine. Ce programme est développé par la société Power Vision Engineering en partenariat avec le LMH et le LME (laboratoire de machine hydraulique et électrique de l'EPFL à Lausanne). Il permet d'étudier les effets transitoires autant dans le domaine de l'hydraulique que dans le domaine électrique. Il est aussi performant dans d'autres applications comme la visualisation de la stabilité d'un réseau ou celle des flux d'énergie transférés par exemple.

La modélisation de la μ _turbine avec son électronique est relativement complexe et a donc été décomposée en cinq parties :

- | | | |
|---|--|----------------|
| - | Modélisation de la génératrice | Chapitre : 5.2 |
| - | Modélisations des inerties | Chapitre : 5.3 |
| - | Représentation des grandeurs par les phaseurs spatiaux | Chapitre : 5.4 |
| - | Régulation du convertisseur de la génératrice (SP 1403) | Chapitre : 5.5 |
| - | Régulation du convertisseur connecté au réseau (SP 1406) | Chapitre : 5.6 |

Chaque partie a été testée indépendamment pour être validée. Puis finalement, toutes ont été regroupées dans un seul modèle :

- | | | |
|---|-----------------------|----------------|
| - | Modélisation générale | Chapitre : 5.7 |
|---|-----------------------|----------------|

5.2 Modélisation de la génératrice

Les génératrices sont modélisées sur la base des mesures réalisées au chapitre 3.2. Les deux génératrices étant strictement identiques et ayant été fabriquées en même temps, la modélisation est détaillée pour un seul prototype. La machine synchrone peut être modélisée comme une charge triphasée composée d'éléments RL et d'une source de tension représentant la tension induite pour chaque phase [4]. Le schéma de principe est visible sur la Figure 37.

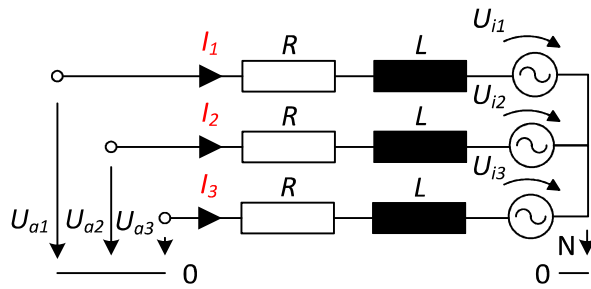


Figure 37: Circuit triphasé

Les valeurs des inductances, des résistances et des sources de tension induite étant très symétriques sur chaque phase, un schéma équivalent pour une phase peut être réalisé. Il est visible sur la figure suivante.

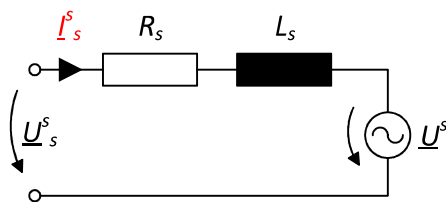


Figure 38: Schéma équivalent simplifié du moteur synchrone

L'inductance L_s représente une inductance de phase et peut être décomposée en deux : une principale et une de fuite.

Équation de la tension de phase (l'exposant 's' indique que les grandeurs sont exprimées dans le système de coordonnées fixe, par rapport au stator) :

$$\underline{U}_s^s = R_s \cdot \underline{I}_s^s + j\omega L_s \cdot \underline{I}_s^s + \underline{U}_i^s \quad (5)$$

Calculs pour la machine synchrone en p.u.

Les grandeurs de référence doivent être rentrées en [p.u.] dans les blocs de programmation Simsens. Les valeurs de référence trouvées lors des tests sur la génératrice sont :

Puissance apparente	S_n	=	1200	[VA]
Tension de ligne	U_n	=	347	[V]
Courant de phase	I_n	=	1.9	[A]
Fréquence électrique	f_n	=	116.6	[Hz]
Paires de pôles	p	=	2	[-]
Résistance statorique	R_s	=	13.3	[Ω]
Inductance principale	L_s	=	23	[mH]
Inductance de fuite	L_{ss}	=	6.7	[mH]

Les paramètres de la machine synchrone ont été mesurés en génératrice. L'inductance du stator a pu être mesurée. Cependant, la différenciation entre l'inductance de fuite et l'inductance principale est difficile à réaliser de manière expérimentale. La valeur de l'inductance de fuite sélectionnée provient donc de la modélisation de la génératrice qui se trouve dans le rapport réalisée par David Melly [3].

Sur la base des valeurs présentées dans le tableau précédent, le calcul des impédances équivalentes a pu être effectué :

$$Z_{equiv.} = \frac{U_{ph}}{I_{ph}} = \frac{U_l/\sqrt{3}}{I_{ph}} = 105.4 [\Omega] = 1 [p.u.] \quad (6)$$

$$\Psi_e = \frac{U_{ind.}}{U_l} = 1.16 [p.u.] \quad (7)$$

$$r_s = \frac{R_s}{Z_{equiv.}} = 0.1261 [p.u.] \quad (8)$$

$$x_d = x_q = x_s = \frac{X_s}{Z_{equiv.}} = 0.16 [p.u.] \quad (9)$$

$$x_{ss} = \frac{X_{ss}}{Z_{equiv.}} = 0.0466 [p.u.] \quad (10)$$

Le moteur peut être considéré comme isotrope, car les aimants sont distribués de manière uniforme sur la surface du rotor et que les perméabilités relatives de l'aimant et de l'air entre les aimants sont quasi identiques. Cela implique que les réactances dans l'axe direct et dans l'axe transverse sont semblables ($x_d = x_q = x_s$).

Les paramètres de la génératrice entrés dans le modèle Simsén ont été validés par une destruction de l'énergie dans des résistances. La tension et le courant se retrouvent en phase sur la charge comme le montre la Figure 39.

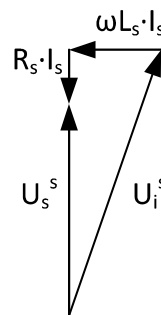


Figure 39: Schémas des vecteurs avec une charge résistive

Les valeurs de puissance (tension et courant) ont été comparées avec celles trouvées lors des tests au laboratoire électrique.

Le modèle Simsén est visible sur la Figure 40.

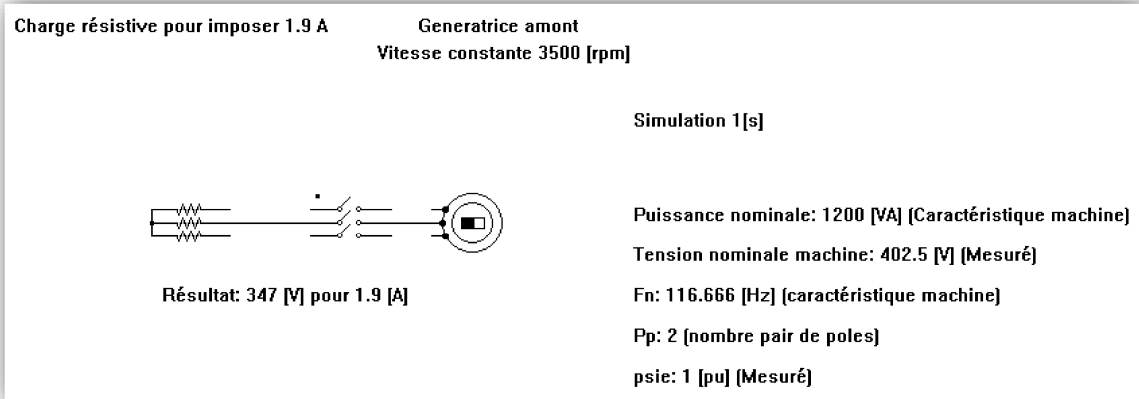


Figure 40: Modèle de la génératrice branchée à une charge résistive

On peut voir de gauche à droite, les résistances de charge, le contacteur et la génératrice à aimants permanents.

Lors de la simulation, la valeur de la charge a été variée en fonction du temps pour visualiser les mêmes points que ceux mesurés lors des tests. La vitesse de rotation a été imposée à la vitesse nominale de la machine. Ci-dessous, on peut comparer la simulation et la mesure.

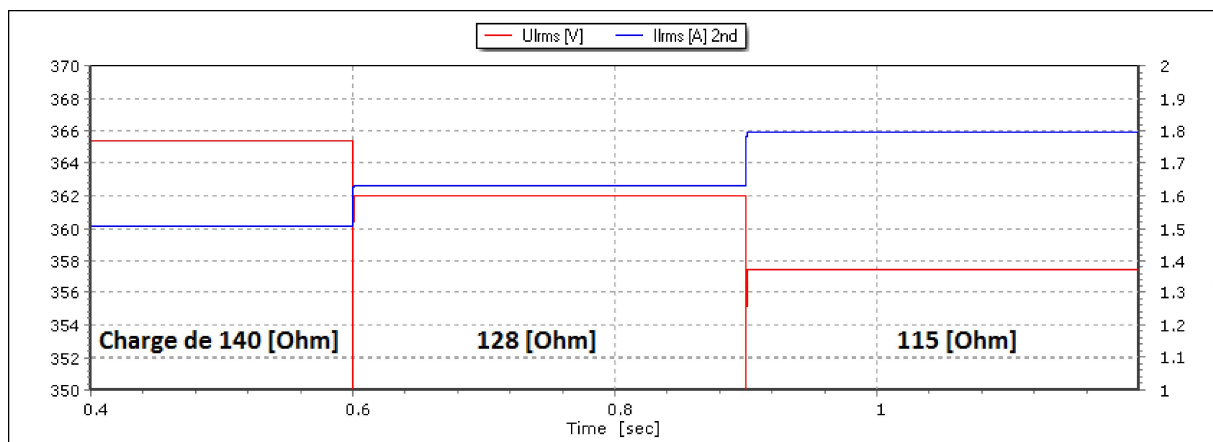


Figure 41: Simulation de la génératrice sur différentes charges ohmiques

Charges [Ω]	Pmec [W]	Pelec [W]	Psimu [W]
140	1040	889	953.8
128	1108	942	1023.7
115	1206	1013	1111

L'erreur augmente avec la puissance jusqu'à atteindre 9.5%. La tension à vide correspond bien à 402.5 [V]. Les saturations du circuit magnétique et les pertes fer dans le modèle ne sont pas implémentées, cela peut expliquer l'écart entre la puissance mesurée et simulée.

5.3 Modélisations des inerties

Le modèle de l'inertie réalisé tient compte des différents éléments mécaniques en rotation et non de l'inertie du fluide qui actionne les roues. Les différentes inerties ont été trouvées à l'aide du modèle de la μ -turbine dessiné sur Inventor et dans la documentation du fabricant pour le couplemètre, elles sont visibles sur la figure suivante (la roue est normalement fixée en bout d'arbre).

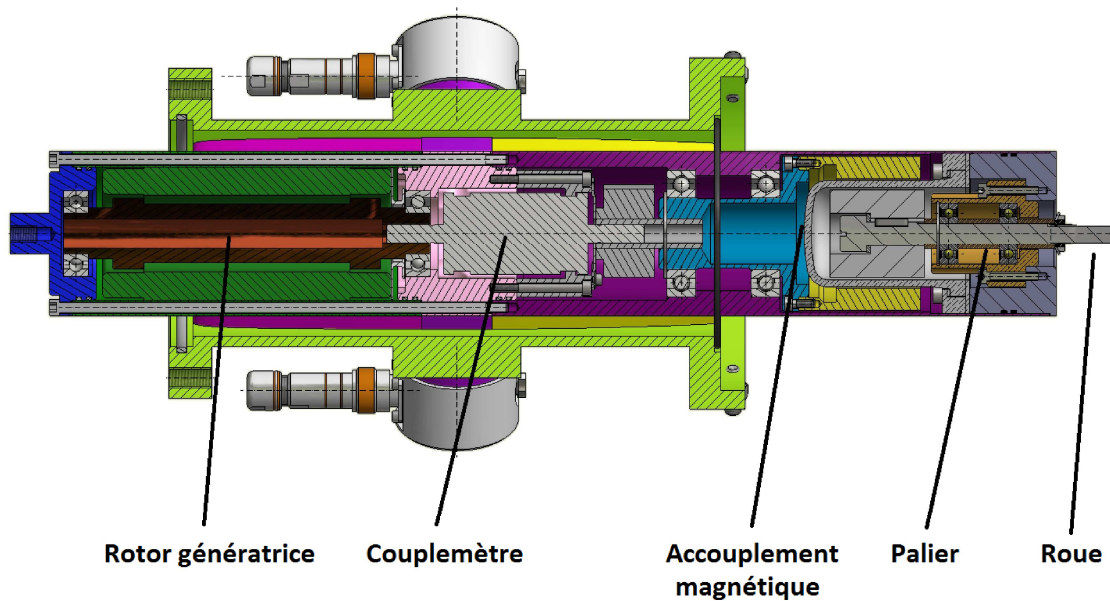


Figure 42: Inerties de la μ -turbine

Les coefficients de déformation en torsion ont été calculés avec les formules suivantes [5] :

$$K_R = \frac{G \cdot I_p}{l} \quad I_p = \frac{\pi \cdot D^4}{32} \quad \rightarrow \quad K_R = \frac{G \cdot \pi \cdot D^4}{32 \cdot l} \quad (11)$$

G	Module de cisaillement	[Pa]
I_p	Moment d'inertie polaire	[m ⁴]
l	Longueur de la pièce	[m]
D	Diamètre de la pièce	[m]

Le tableau suivant résume les différents coefficients trouvés.

Masse accouplée	Inertie J [Kgm ²]	Rigidité K _R [Nm/rad]
Rotor	$1.5 \cdot 10^{-4}$	28900
Couplemètre	$6.67 \cdot 10^{-7}$	417
Palier	$2.85 \cdot 10^{-4}$	25
Accouplement magnétique	$1.063 \cdot 10^{-4}$	1200
Roue amont + bague	$9.81 \cdot 10^{-4}$	
Roue aval + bague	$9.78 \cdot 10^{-4}$	

Le facteur K_R pour l'accouplement magnétique était plus dur à quantifier, car il varie de manière sinusoïdale en fonction du couple transmis. Il a été trouvé de manière graphique sur la base d'un modèle maxwell réalisé par David Melly. Il correspond à une linéarisation autour du point de fonctionnement nominal de la μ_{turbine} , voir (Annexe 7). L'inertie des roues doit être augmentée de $0.6 \cdot 10^{-4}$ [J/kgm²] si l'on veut tenir compte de l'inertie de l'eau comprise entre les pales.

Deux modèles ont été réalisés :

- le premier en détaillant les inerties J [Kgm²] et les coefficients de rigidité en torsion K [Nm/rad] de chaque élément de la chaîne cinématique
- le deuxième en regroupant toutes les inerties dans une seule équivalente.

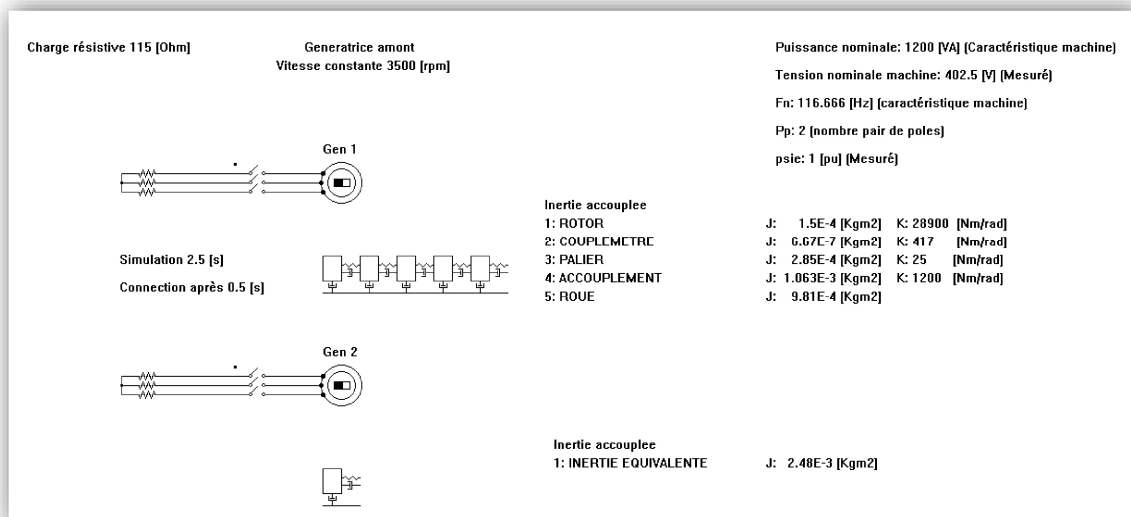


Figure 43: Modèle de l'inertie

On peut visualiser les inerties accouplées en série à la génératrice une et l'inertie équivalente connectée à la génératrice deux.

Simulation

Pour visualiser l'influence des différentes inerties, les deux machines sont lancées à pleine vitesse en roue libre, puis connectées après 0.1 seconde à une charge résistive correspondante à la charge nominale. On s'attend à voir une décélération de la forme exponentielle.

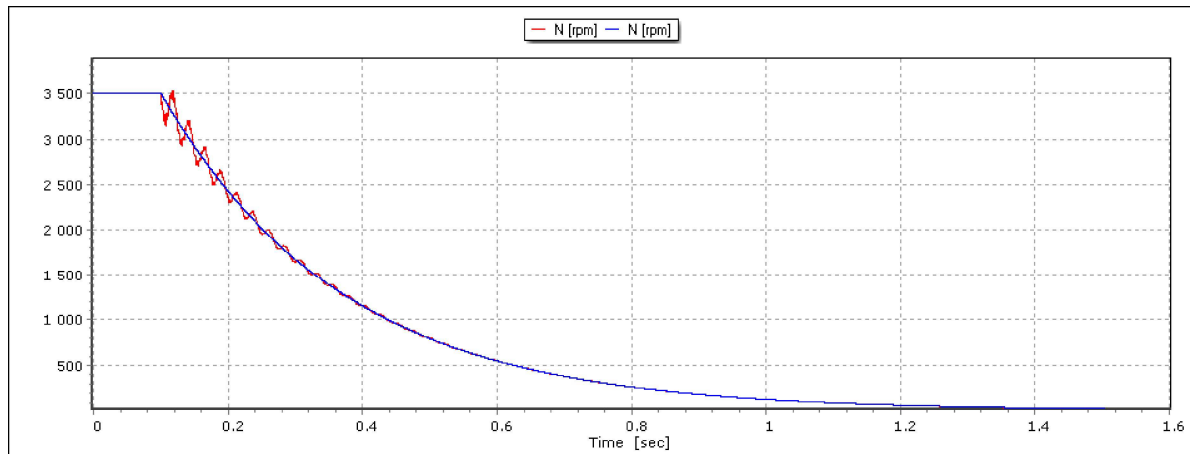


Figure 44: Simulation de la chaîne d'inerties et de l'inertie équivalente

On peut constater que le modèle d'inertie équivalente ne permet pas de visualiser les différences de vitesse entre chaque élément de la chaîne cinématique comme le fait le modèle détaillé. Cependant, il suit parfaitement la décroissance exponentielle de vitesse.

Le modèle d'inertie équivalente offre un temps de simulation beaucoup plus court. C'est donc lui qui sera utilisé pour la suite.

5.4 Représentation des grandeurs par les phaseurs spatiaux

Introduction

Pour simplifier la régulation, une méthode utilisée consiste à changer de référentiel. Cette transformation est connue sous le nom de Transformation de Park [4]. Les phaseurs spatiaux sont très adaptés pour représenter des phénomènes stationnaires et transitoires. Ils sont aussi bien adaptés pour représenter des systèmes triphasés comme les charges (moteur synchrone ou asynchrone). Ils sont d'ailleurs amplement utilisés pour la modélisation de convertisseurs statiques et de machines électriques.

Phaseurs spatiaux en régime stationnaire

Sur la figure suivante, on peut voir les différentes étapes de transformations. La colonne de gauche représente la transformation pour un signal sinusoïdal et la colonne de droite celle d'un signal carré.

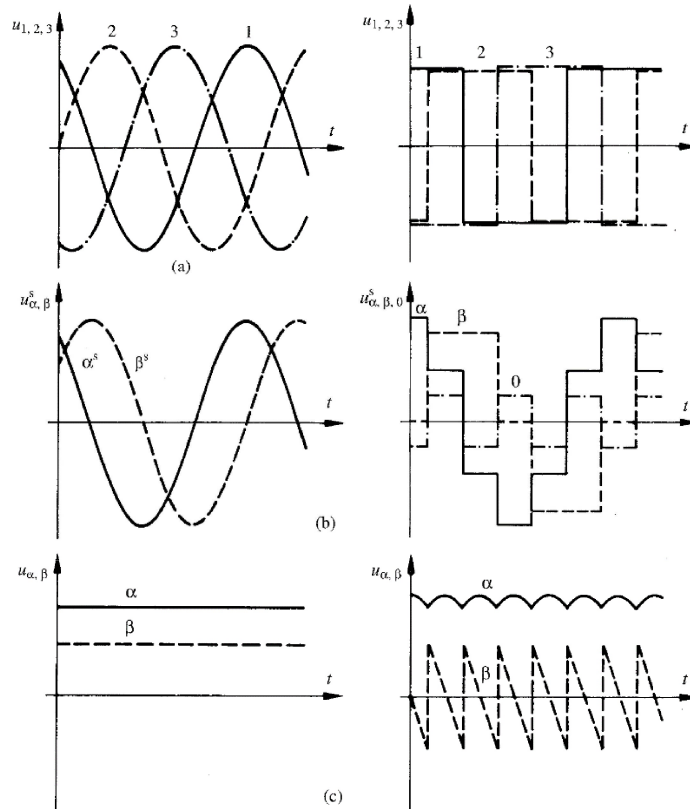


Figure 45: Transformation de Park pour un signal sinusoïdal et un carré. [4]

On constate que les phaseurs spatiaux se prêtent autant bien aux phénomènes sinusoïdaux qu'aux phénomènes non sinusoïdaux comme les signaux de type PWM.

Transformations

Les formules suivantes permettent de représenter des phaseurs dans différents référentiels. Ces équations ont directement été introduites dans le modèle.

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \hat{U} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\ u_2 &= \hat{U} \cdot \cos(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ u_3 &= \hat{U} \cdot \cos(\omega t + \varphi - 4\pi/3) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

La première étape représente la transformation des tensions triphasées dans un système de coordonnées fixes.

$$\left. \begin{aligned} u_{\alpha}^s &= u_1 = \hat{U} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \\ u_{\beta}^s &= \frac{1}{\sqrt{3}}(u_2 - u_3) = \hat{U} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

La deuxième étape représente le passage dans le système de coordonnées tournant à la vitesse de rotation angulaire ω_s .

$$\left. \begin{aligned} u_\alpha &= u_\alpha^s \cdot \cos(\theta_s) + u_\beta^s \cdot \sin(\theta_s) = \hat{U} \cdot \cos(\varphi) \\ u_\beta &= -u_\alpha^s \cdot \sin(\theta_s) + u_\beta^s \cdot \cos(\theta_s) = \hat{U} \cdot \sin(\varphi) \\ \theta_s &= \theta_0 + \int_0^t \omega_s dt = \omega_s t \text{ si } \theta_0 = 0 [\text{rad}] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Les valeurs u_α et u_β représentent des constantes pour un régime stationnaire, où \hat{U} et φ sont constants.

Les transformations inverses, permettant de recréer les trois tensions de phases sont :

$$\left. \begin{aligned} u_\alpha^s &= u_\alpha \cdot \cos(\theta_s) - u_\beta \cdot \sin(\theta_s) \\ u_\beta^s &= u_\alpha \cdot \sin(\theta_s) + u_\beta \cdot \cos(\theta_s) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= u_\alpha^s \\ u_2 &= \frac{-1}{2} u_\alpha^s + \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta^s \\ u_3 &= \frac{-1}{2} u_\alpha^s - \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta^s \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Le modèle de transformation est présenté ci-dessous.

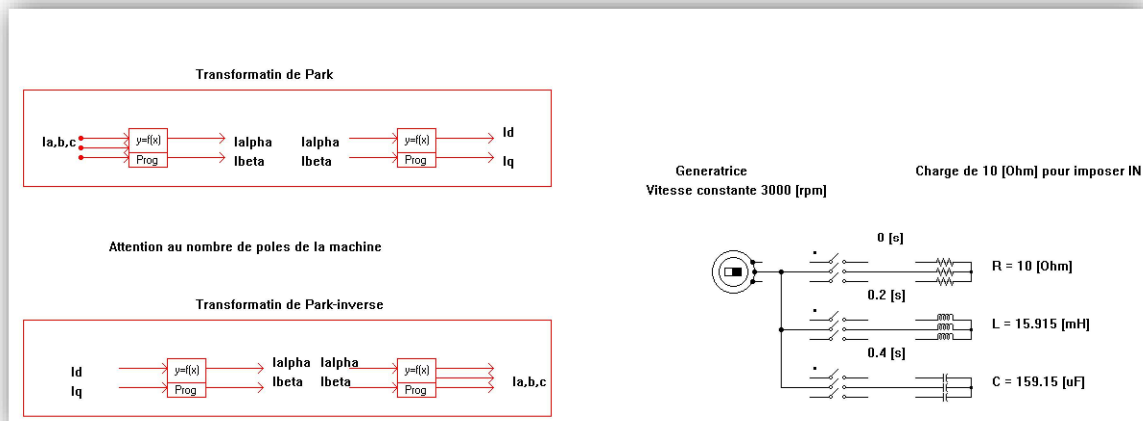


Figure 46: Transformation de Park

Sur la partie de gauche, on peut voir la transformation, ainsi que son inverse. Sur la droite, on peut voir la génératrice et ses différentes charges qui constituent la partie puissance.

La validation du bon fonctionnement de ce bloc s'est faite en connectant de manière séquentielle, différents types de charges à notre générateur. Ainsi les signaux générés par les transformations ont été identifiés pour des charges de types purement résistives, inductives et capacitatives de même impédances. Le résultat de la simulation est visible sur la Figure 47. Cette transformation est très importante, car elle permet l'utilisation d'une régulation standard avec des signaux pseudo-continus.

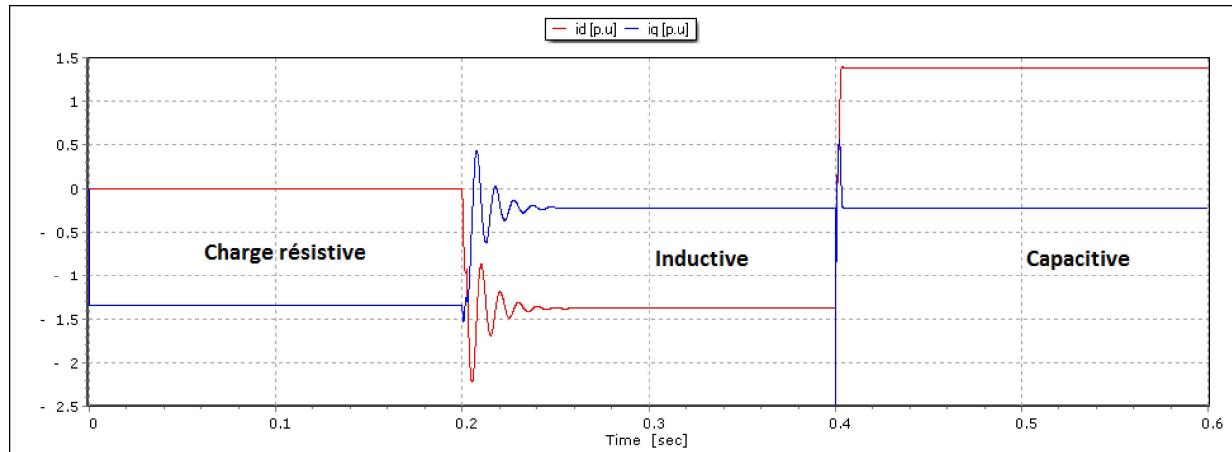


Figure 47: Simulation de la transformation de Park

Sur la simulation, on constate que les courants I_d et I_q s'inversent bien lors du passage d'une charge inductive à capacitive. Le courant I_d qui continue de circuler après 0.2 [s] est dû à la résistance du stator. Dans une autre simulation, il a été constaté que les signaux, avant et après les différentes transformations, sont semblables. Le bloc de conversion des signaux en phaseurs spatiaux a donc pu être validé.

5.5 Régulation du convertisseur de la génératrice (SP 1403)

Réglage de la machine synchrone

Il a été choisi de piloter la génératrice par imposition d'une vitesse de rotation. Pour pouvoir atteindre et maintenir la vitesse de consigne imposée, une boucle de réglage de vitesse doit être implémentée. Le réglage du couple n'est pas imposé par l'utilisateur et est géré en interne par le convertisseur. La régulation se compose donc d'une boucle de réglage interne gérant les courants statoriques et d'une boucle de réglage de vitesse superposée. Le schéma de principe du réglage de courant est visible sur la Figure 48.

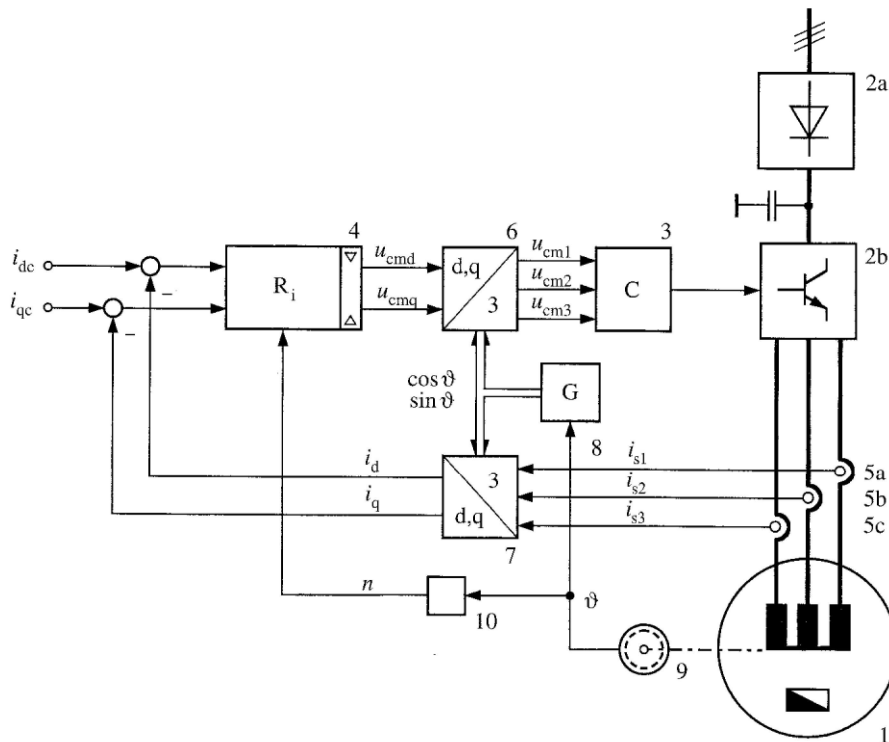


Figure 48: Schéma de principe du réglage du courant statorique par un régulateur PI multivariable. [4]

Le bloc 1 représente la génératrice modélisée au chapitre 5.2. Les blocs 6 et 7 représentent les transformations de Park modélisées au chapitre 5.4. Le bloc 4 représente la boucle de réglage interne des courants statoriques. Il est composé de deux régulateurs de type 'PI' et de deux régulateurs de type 'I' fonctionnant en contre-réaction proportionnellement à la vitesse de rotation. Son schéma de principe est détaillé ci-dessous.

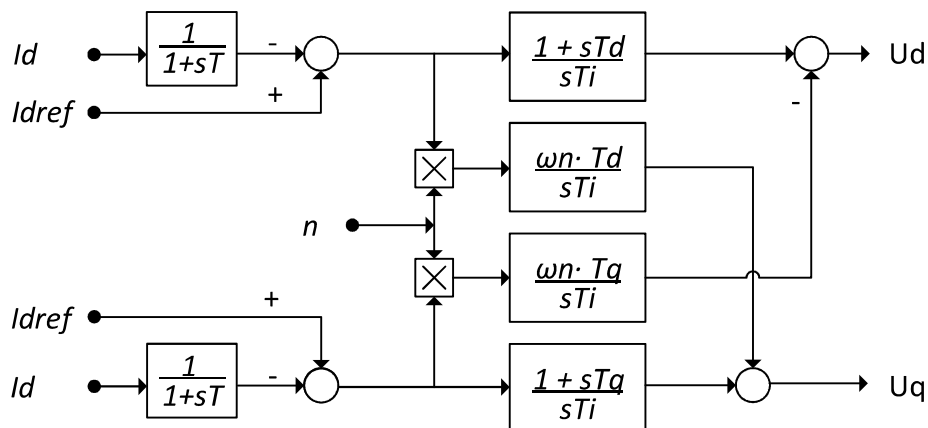


Figure 49: Structure du régulateur PI multivariable

Dimensionnement du régulateur PI multivariable

Les grandeurs permettant le dimensionnement des régulateurs sont présentées ici. La fréquence des filtres de mesures a été choisie pour couper l'influence de la PWM tout en laissant passer la fondamentale du moteur.

f_{pwm}	=	6000	[Hz]
ω_n	=	116.6	[Hz]
u_n	=	347	[V]
u_{dc}	=	700	[V]
x_d	=	0.16	[p.u.]
r_s	=	0.126	[p.u.]
f_{flt}	=	1250	[Hz]

T_s	=	Constante de temps du stator
T_i	=	Constante de temps d'intégration
K	=	Coefficient en fonction du type de capteur utilisé
T_{pE}	=	Petite constante de temps résultante
T_{em}	=	Constante de temps du au signal triangulaire de la PWM
T_{mes}	=	Constante de temps de l'organe de mesure

Ci-dessous, les calculs pour dimensionner le régulateur PI multivariable [4] sont visibles. La génératrice étant isotrope, les régulateurs possèdent les mêmes gains sur les axes directs et transverses. Le calcul des coefficients a donc été réalisé une seule fois.

$$T_{sd} = T_{sq} = T_s = \frac{x_d}{\omega_n \cdot r_s} = \frac{L_d}{R_s} = \frac{29.7 \cdot 10^{-3}}{13} = 2.23 \text{ [ms]} \quad (17)$$

$$T_i = 2 \cdot K \cdot T_{pE} = 19.3 \text{ [ms]} \quad (18)$$

$$u_e = \frac{U_{dc}}{U_n \cdot \sqrt{2}} = \frac{700}{347 \cdot \sqrt{2}} = 1.426 \quad (19)$$

$$K = \frac{u_e}{r_s} = \frac{1.46}{0.126} = 11.3 \quad (20)$$

$$T_{pE} = T_{em} + T_{mes} = 855 \text{ [}\mu\text{s]} \quad (21)$$

$$T_{em} = \frac{T_p}{3} = \frac{1}{3 \cdot f_{pwm}} = \frac{1}{3 \cdot 6000} = 55 \text{ [}\mu\text{s]} \quad (22)$$

$$T_{mes} = \frac{1}{f_{flt}} = \frac{1}{1250} = 800 \text{ [}\mu\text{s]} \quad (23)$$

Les équations caractéristiques des régulateurs étant implémentées différemment dans le logiciel Simsen, une comparaison des coefficients obtenus ci-dessus avec la méthode présentée par Hansruedi Bühler est nécessaire.

Type de régulateur	Méthode Bühler	Méthode Simsen
PI	$\frac{1 + sT_s}{sT_i}$	$K \cdot \frac{1 + sT_1}{sT_1}$
I	$\frac{\omega_n \cdot T_s}{sT_i}$	$\frac{1}{sT_1}$

La comparaison des équations donne les résultats suivants :

Pour les paramètres du régulateur PI.

$$T_1 = T_s = 2.23 [ms] \quad K = \frac{T_s}{T_i} = 0.116 \quad (24)$$

Pour les paramètres du régulateur I.

$$T_1 = \frac{T_i}{\omega_n \cdot T_s} = 11.8 [ms] \quad (25)$$

Boucle de réglage de vitesse

Le choix a été fait d'utiliser la stratégie de commande optimale pour le couple électromagnétique [4], car elle est implémentée sur le convertisseur. Cette stratégie vise à maximiser le couple là où l'affaiblissement du champ n'est pas nécessaire. Elle offre aussi l'avantage d'imposer une consigne de courant statorique $i_d = 0$, et i_q est égal au couple électromagnétique. La boucle de vitesse générant les consignes est donc simplifiée. Les figures de la page suivante montrent la relation entre le couple et le courant ainsi que l'angle entre la tension induite et le courant.

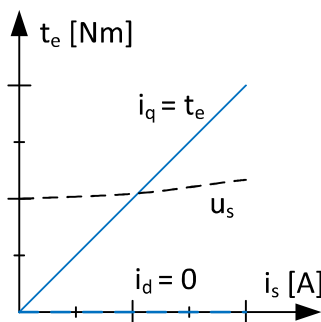


Figure 50: Maximisation de couple

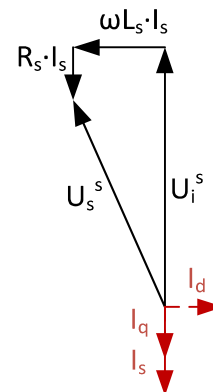


Figure 51: Schéma vectoriel de la génératrice

La régulation de vitesse a été réalisée avec un régulateur de type 'PI'. Ces coefficients ont été optimisés de manière empirique pour avoir une réponse rapide avec un dépassement inférieur à 20 % de la consigne. Il faut noter que leur influence est relativement limitée et engendre seulement une variation de temps pour atteindre la consigne. La sortie du régulateur est bornée à dix fois la valeur nominale pour éviter des dépassements trop importants lors de l'enclenchement.

Le schéma suivant présente la régulation du convertisseur SP1403.

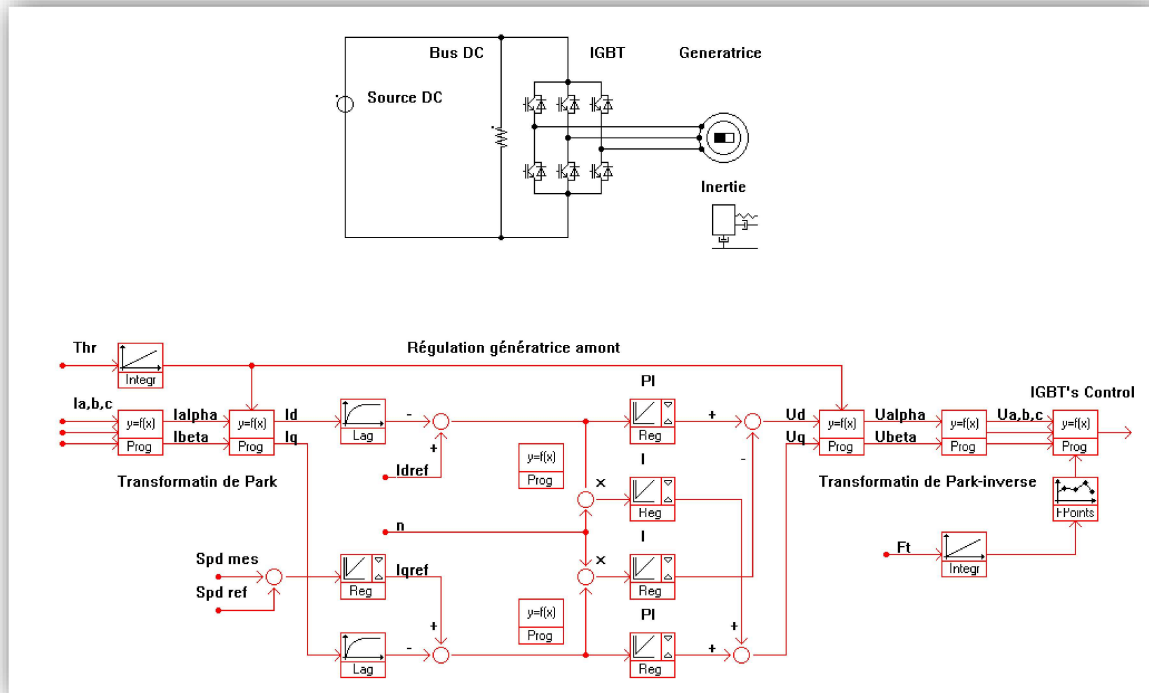


Figure 52: Schéma Simsens de la régulation du convertisseur de la génératrice

On peut voir sur la partie supérieure le bus DC, le pont d'IGBT et la génératrice qui constituent la partie puissance. Sur la partie inférieure, on perçoit le schéma de commande composé de la transformation de Park, des filtres de consignes ainsi que du réglage de vitesse, du régulateur 'PI' multivariable, de la transformée inverse et de la commande PWM des IGBT.

Simulation

Pour visualiser le bon fonctionnement de la régulation, une simulation montrant différents états du système est présentée ci-dessous.

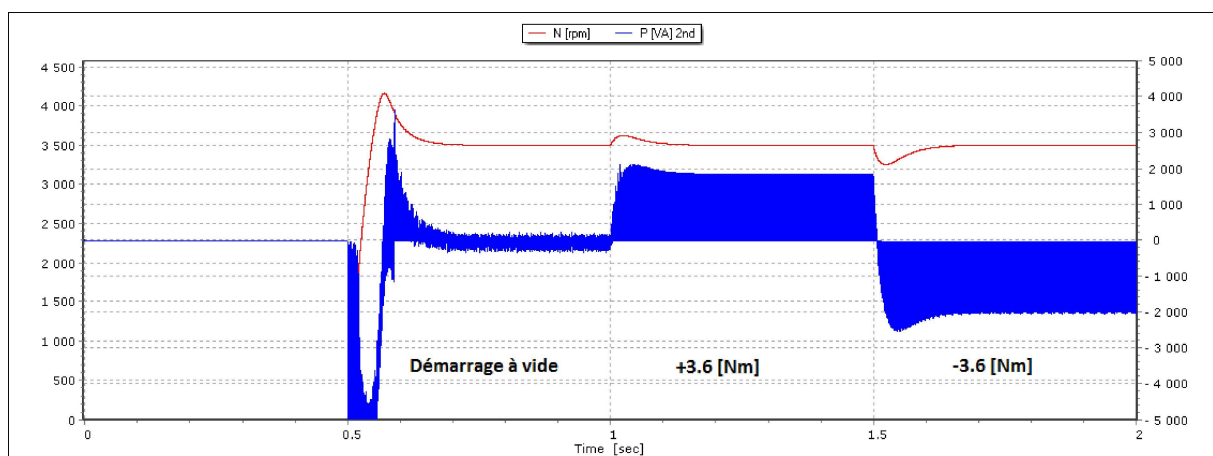


Figure 53: Simulation de la régulation du convertisseur de la génératrice

Les différents états sont :

- Démarrage à vide jusqu'à la vitesse nominale (3500 [rpm]). $t = 0.5$ [s]
- Couplage d'une charge nominale (3.6 [Nm]) à l'arbre de la μ _turbine (fonctionnement en générateur). $t = 1$ [s]
- Couplage d'une charge de -3.6 [Nm] (fonctionnement en moteur). $t = 1.5$ [s]

On constate la bonne dynamique du système lors d'un changement de consigne de couple. La valeur rms de la puissance en pleine charge vaut environ 1285 [W]. Elle est supérieure à celle trouvée en mesure. Cela peut s'expliquer par le fait que le modèle ne tient ni compte des pertes mécaniques dans les roulements, ni des saturations, ni des pertes fer.

5.6 Régulation du convertisseur connecté au réseau (SP 1406)

Réglage des flux de puissance

Le convertisseur de réseau a pour fonction de maintenir la tension du bus DC à une valeur constante de 700 [V]. Pour ce faire, une boucle de réglage de la tension doit être implémentée. Pour le réglage des flux de puissance, le choix a été fait d'injecter seulement de la puissance active sur le réseau. La régulation se compose d'une boucle de réglage interne gérant les courants et d'une boucle de réglage de la tension superposée. Dans cette situation, le nombre de degrés de liberté du convertisseur est inférieur au cas vu précédemment, car les tensions de bus et de réseaux sont considérées comme plus ou moins constantes. Le régulateur multivariable peut donc être simplifié en enlevant les régulateurs de contre-réaction 'I'.

Ce convertisseur possède plusieurs fonctions :

- Au démarrage, il a la fonction de précharge du bus DC à environ 540 [V] par le redresseur à diodes triphasé, comme vu chapitre 4.6.
- Après environ une seconde, le pont de diodes est découplé et le pont d'IGBT est connecté.
- La consigne de tension du bus étant fixée à 700 [V], les IGBT complètent donc son chargement.

Par la suite deux modes de fonctionnements sont possibles :

- Transfert d'énergie du réseau vers le bus DC
- Transfert d'énergie du bus DC vers le réseau

Redresseur à diodes

Le redresseur est composé de six diodes montées en pont triphasé. Ce mode de fonctionnement n'est pas détaillé, car il est utilisé seulement à l'enclenchement et qu'il ne présente pas de réglage particulier.

Dimensionnement du régulateur PI

Le calcul des paramètres a été réalisé avec la méthode de Ziegler Nichols [6]. Le schéma de principe du régulateur est détaillé ci-dessous. Le choix d'injecter sur le réseau seulement de la puissance active facilite à nouveau la régulation. En effet, la consigne de courant I_d est à nouveau imposée à zéro.

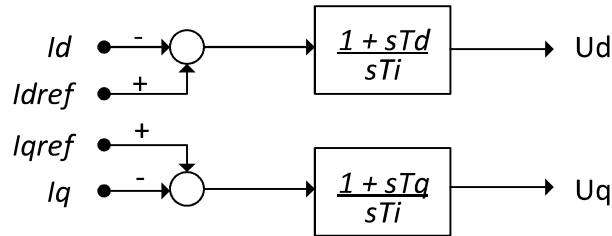


Figure 54: Régulateur PI du courant

Calculs

Le calcul des constantes T_u et T_g a été effectué en traçant la tangente à la réponse du système lors d'un saut de consigne comme le montre la figure suivante.

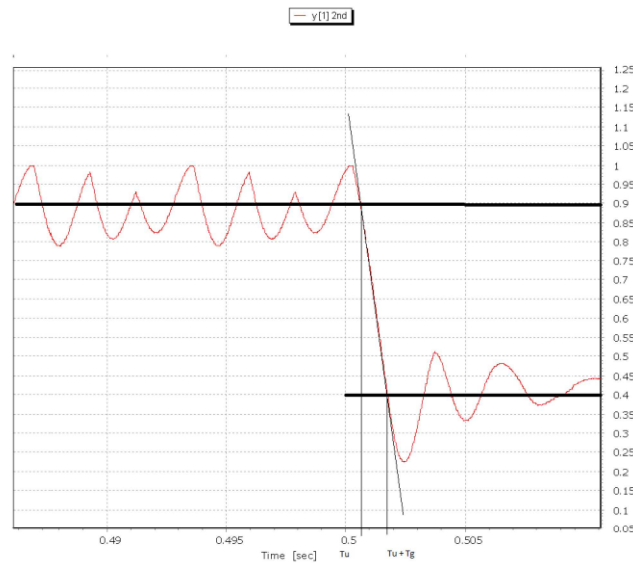


Figure 55: Recherche des coefficients T_u et T_g

$$K_p = 0.9 \cdot \frac{T_u}{T_g} = 1.65 \quad (26)$$

$$T_i = 3.3 \cdot T_u = 19.8 [ms] \quad (27)$$

Boucle de réglage de la tension du bus DC

Le réglage de la tension de bus est réalisé à l'aide d'un régulateur 'PI'. Ces coefficients ont été choisis pour avoir le moins d'ondulation de tension possible sur le bus, tout en gardant une bonne dynamique face aux variations de tension engendrées par les changements de flux de puissance des génératrices. Les coefficients n'ont pas pu être déterminés de manière analytique car plusieurs paramètres sont inconnus comme la valeur des condensateurs du bus DC ou encore le temps que met la tension pour se stabiliser lors d'une variation. Le modèle Simsen de la régulation du convertisseur connecté au réseau est présenté à la Figure 56.

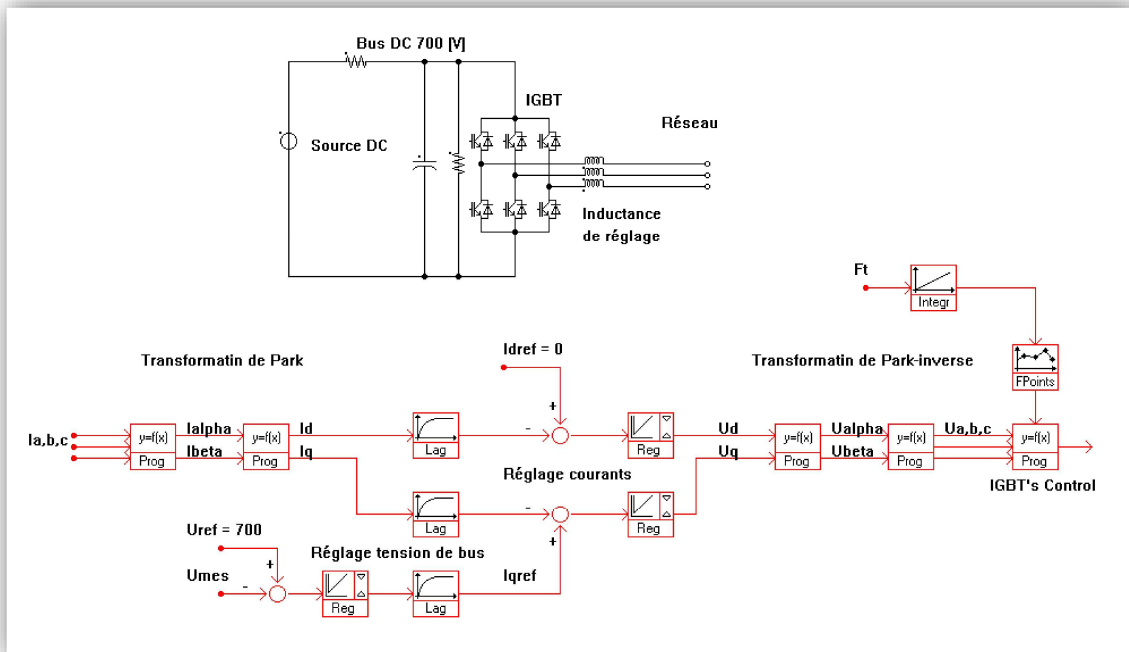


Figure 56: Modèle de la régulation du convertisseur de réseau

On peut constater la ressemblance avec le schéma de la Figure 52. Pour la partie puissance, la génératrice a été remplacée par le réseau et les inductances de réglage. Pour la partie commande, on peut voir que le régulateur PI multivariable a été simplifié. On constate aussi que la boucle de réglage de vitesse s'est transformée en boucle de réglage de tension.

Simulation

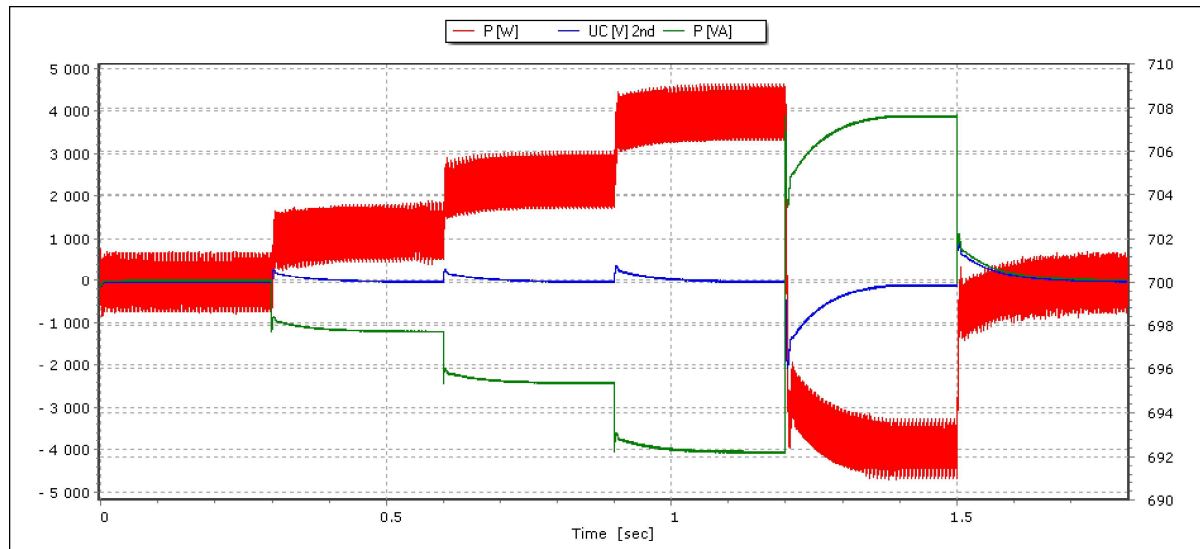


Figure 57: Simulation de la régulation du convertisseur de réseau

Sur la simulation, on peut voir le résultat après différents sauts de puissance injectée et consommée :

- Une génératrice (1140 [W] et 60 [W] de pertes). $t = 0.3$ [s]
- Deux génératrices (2327 [W] et 78.5 [W] de pertes). $t = 0.6$ [s]
- La puissance nominale du convertisseur en injection (4050 [W] et 85 [W] de pertes). $t = 0.9$ [s]
- La puissance nominale du convertisseur en consommation (3876 [W] et 100 [W] de pertes). $t = 1.2$ [s]
- Aucune puissance injectée. $t = 1.5$ [s]

On constate que les valeurs des puissances sont correctes. Cependant, les pertes ne correspondent pas parfaitement aux pertes mesurées au chapitre 4.7. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette différence. Une raison peut être le temps de commutation des IGBT qui n'est pas connu et qui a été estimé à 5 [μ s].

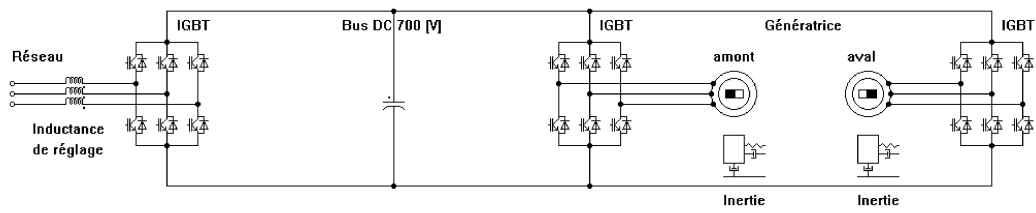
5.7 Modélisation générale

Modèle complet

Les différents blocs expliqués précédemment ont été regroupés pour réaliser le modèle électrique global de la μ -turbine et de ses convertisseurs. Le schéma complet est visible sur la Figure 58. La partie supérieure du schéma rassemble les éléments qui constituent la partie puissance. Les quatre rectangles de la partie inférieure qui représentent la partie commande sont :

- La régulation du convertisseur de réseau.
- La régulation de la génératrice amont.
- La régulation de la génératrice aval.
- Le générateur de couple.

La régulation de la génératrice amont et aval est tout à fait semblable. Les trois premiers blocs ont donc déjà été traités précédemment. Le générateur de couple n'a pas fait l'objet d'un chapitre à part et va donc être brièvement expliqué ici. Ce bloc permet de retrouver le couple à l'arbre de chaque génératrice en fonction de la vitesse de rotation et du débit sélectionné. Les équations entrées dans ce bloc proviennent des extrapolations du troisième ordre trouvées au chapitre 4.2 (Figure 21 et Figure 22). Les consignes de vitesse et de débit peuvent être imposées entre 500 et 3250 [tr/min] et entre 10 et 40 [m³/h]. Il faut cependant faire attention à rester dans la plage de couple où le modèle est valide.



Régulation convertisseur réseau

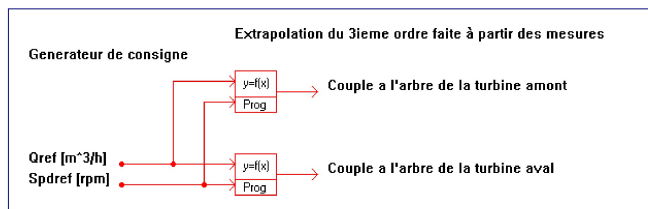
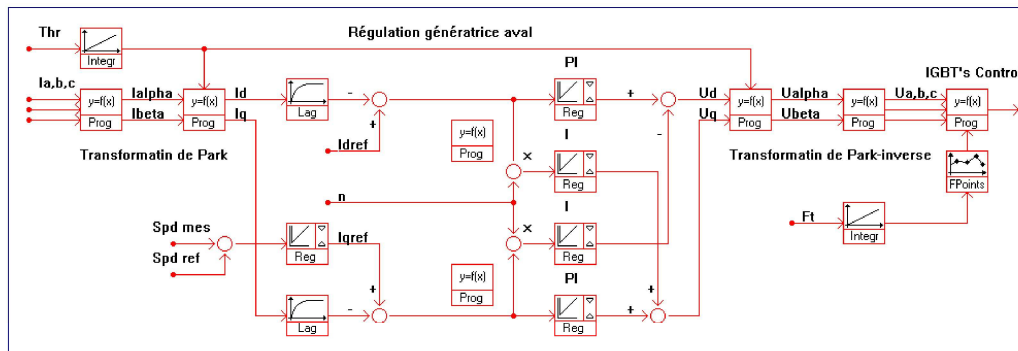
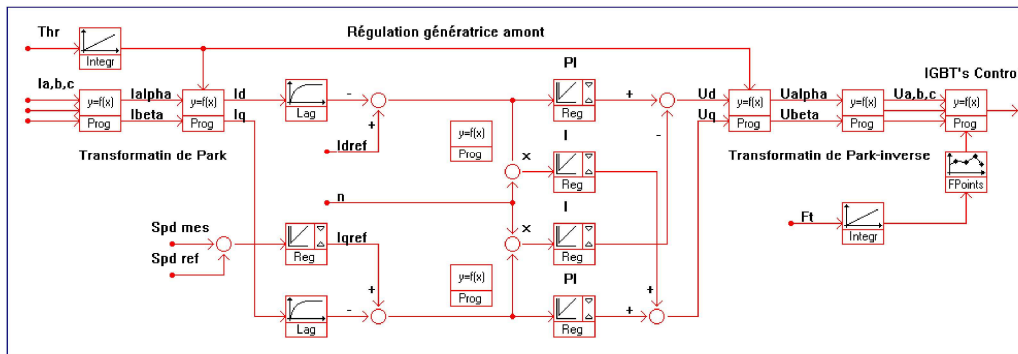
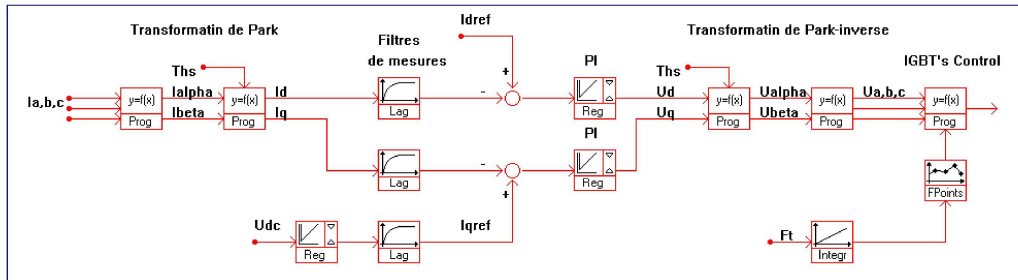


Figure 58: Modèle global de la μ turbine

Simulation

Un exemple de simulation est visible ci-dessous. Le point de fonctionnement a été choisi à 3250 [rpm] pour un débit de 28.3 [m³/h].

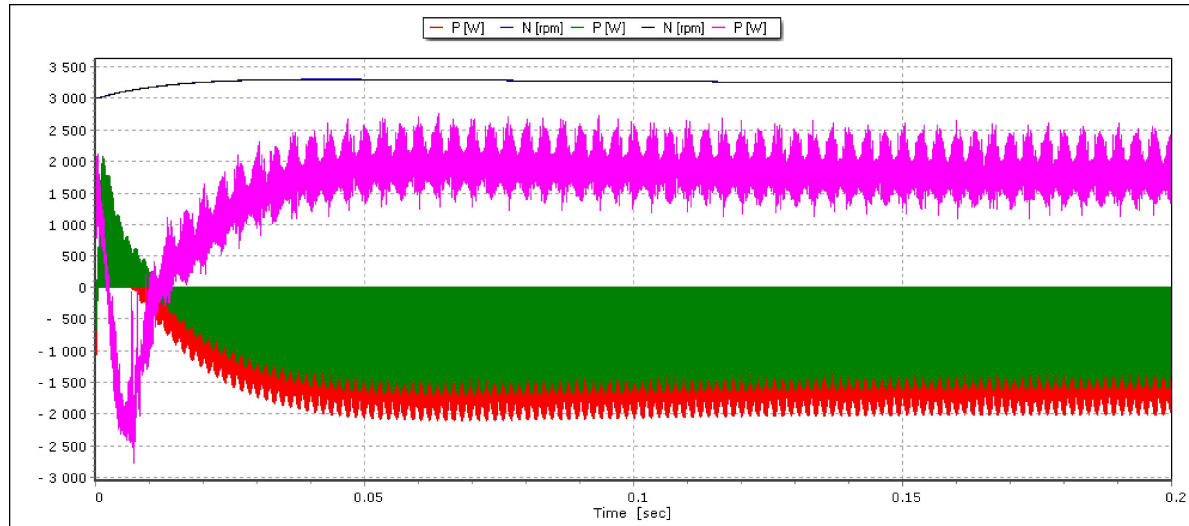


Figure 59: Simulation global de la μ _turbine (3250 [rpm], 28.3 [m³/h])

Les signaux visibles sont les suivants : puissance et vitesse de la génératrice amont, puissance et vitesse de la génératrice aval ainsi que la puissance injectée sur le réseau.

La valeur rms à partir de 0.18 [s] donne :

Source	Puissance [W]	Couple [Nm]	Vitesse [rpm]
Génératrice amont	1348	3.56	3250.3
Génératrice aval	1064	2.77	3250.3
Réseau	1848	-	-

On constate que la vitesse et le couple correspondent parfaitement aux mesures effectuées. Les valeurs des couples de frottements et des pertes fer ne sont pas implémentées. Les pertes de commutation et de conduction n'ont pas pu être mesurées, les paramètres pour les IGBT (temps de commutation, résistance de conduction) ont donc été choisis de manière générale. La valeur du condensateur n'est pas non plus mesurable, elle a donc aussi été évaluée (5 [mF]) pour limiter l'ondulation de tension du bus DC.

Les valeurs des puissances simulées sont supérieures à celles mesurées. Cela est dû aux pertes négligées comme vu précédemment. On voit aussi que la puissance est pulsée, cet effet diminue en augmentant la fréquence de commutation des IGBT.

Sur la simulation suivante, on peut voir le comportement des régulateurs du convertisseur de la génératrice amont. La charge sur la génératrice passe de +3.6 [Nm] à - 3.6 [Nm] à 1.5 [s].

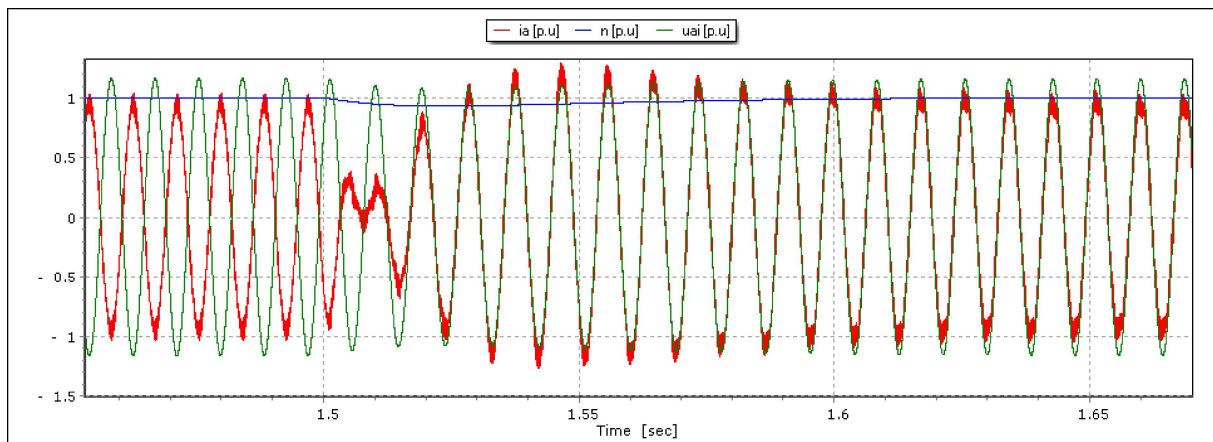


Figure 60: Simulation global de la μ _turbine, visualisation du courant et de la tension dans la génératrice

On peut constater que le courant de la génératrice est bien imposé en opposition de phase ou en phase avec la tension induite selon la situation. On constate aussi que la régulation réagit rapidement face au changement de couple.

Sur la simulation suivante, la tension ainsi que le courant du réseau peuvent être observés.

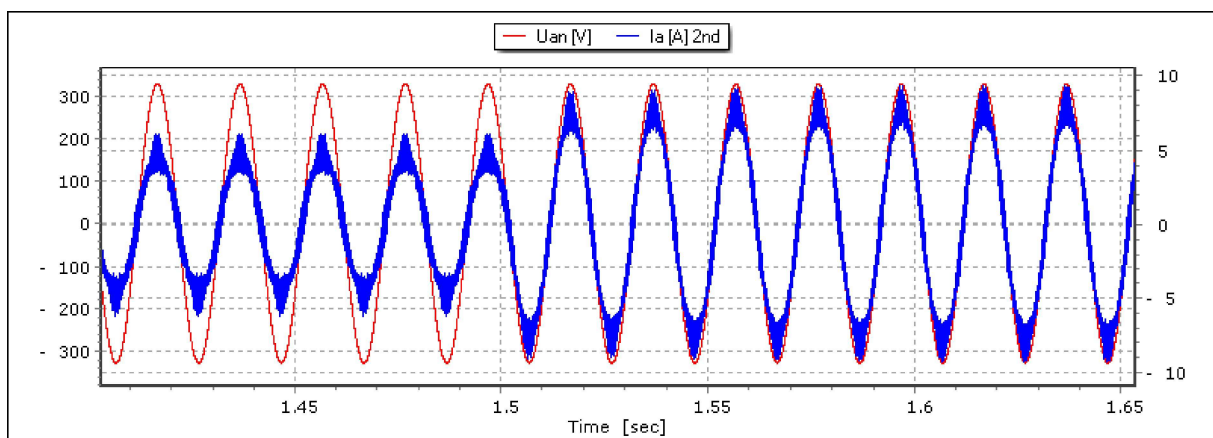


Figure 61: Simulation global de la μ _turbine, visualisation du courant et de la tension sur le réseau

On peut voir à 1.5 [s] que le courant s'adapte immédiatement à l'augmentation de puissance transférée.

En conclusion, le modèle réagit rapidement. Il est utilisable dans la plage de fonctionnement définie au chapitre 4.2. Il peut cependant être perfectionné par l'ajout des éléments cités ci-dessus (pertes).

6. Amélioration du système de mesure

6.1 Introduction

Comme présenté dans le contexte du projet, le prototype souffre de problèmes de précision de mesures. Des perturbations électromagnétiques influencent grandement certaines boucles de mesures. Tous les capteurs sont affectés, mais à des niveaux différents. Parallèlement aux campagnes de mesures et modélisations effectuées, une analyse et une amélioration de la qualité des signaux a été réalisée. La source de perturbation n'étant pas connue, la solution utilisée dans un premier temps fut de filtrer numériquement tous les signaux mesurés.

6.2 Analyse des signaux

Le choix s'est porté sur les signaux des couplemètres, car ils fonctionnent en tension et sont beaucoup plus sensibles aux problèmes EMC. La figure ci-dessous montre l'état du signal avec les convertisseurs Unidrive SP respectivement éteints puis allumés. Les mesures ont été effectuées sur le banc de test hydraulique.

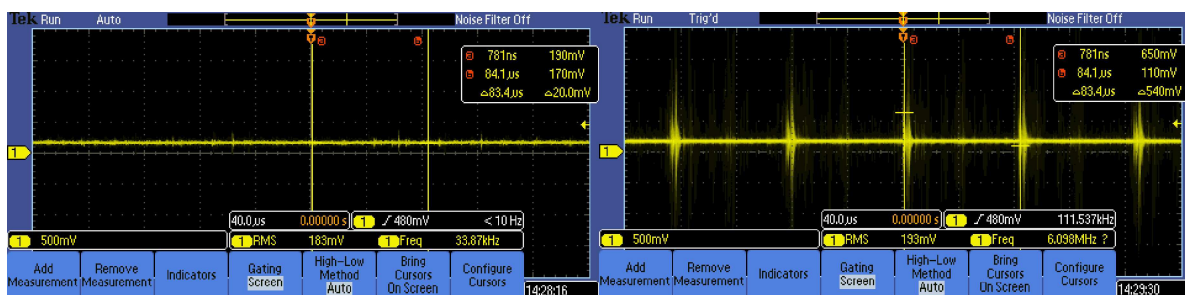


Figure 62: Mesure couple, convertisseurs OFF/ convertisseurs ON

Nous constatons que deux signaux, superposés au signal continu principal, apparaissent lors de l'enclenchement des deux convertisseurs.

La fréquence de ces signaux est de :

$$f_{\text{perturbation}} = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{83.4 \cdot 10^{-6}} = 11.9 \text{ [KHz]} \quad (28)$$

La fréquence de commutation des convertisseurs est réglée sur 6 [KHz]. Après variation de cette fréquence entre 6 et 12 [KHz], on a pu constater que la fréquence des perturbations valait toujours le double de cette fréquence. Les perturbations semblent donc émaner des convertisseurs Unidrive (Figure 17). Pour pouvoir déterminer avec certitude cette hypothèse, la μ_{turbine} a été testée hors de son banc de test hydraulique.

Les mesures ci-dessous ont été effectuées avec le prototype monté sur le banc de test électrique (Figure 1).

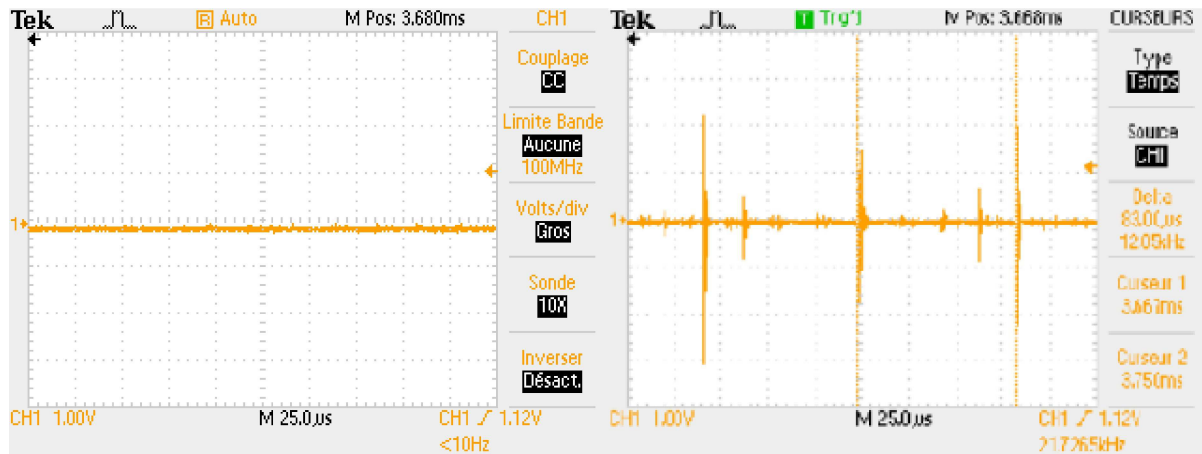


Figure 63: Signal de mesure du couplemètre testé sur le banc de test électrique. Convertisseurs OFF / Convertisseurs ON

On constate que la forme et la fréquence des pics de tension sont similaires aux mesures effectuées sur le banc de test hydraulique. Les perturbations ne proviennent donc pas de celui-ci.

La forme du signal a tendance à indiquer une perturbation en mode commun. Une mesure du courant sur l'alimentation de la génératrice a été réalisée pour valider cette intuition. Celle-ci a été prise en introduisant les trois phases dans une sonde de courant (Teledyne LeCroy CP150). La somme vectorielle des trois courants devrait être nulle à tous moments.

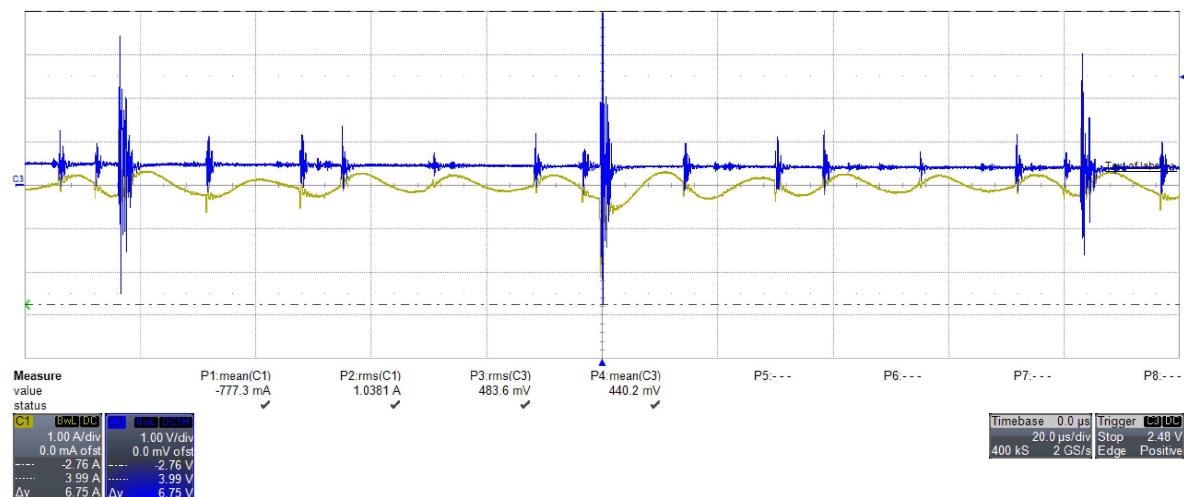


Figure 64: Mesure du courant en mode commun

On constate sur le signal du premier canal qu'un courant de fuite à la terre circule. Sur le deuxième canal, on voit que l'amplitude des pics atteint des valeurs supérieures à 6 [V].

6.3 Essai de filtrage

Des problèmes d'amplification de bruits ou d'encombrement ont poussé à ne pas mettre certaines terres et à ne pas raccorder certains blindages.

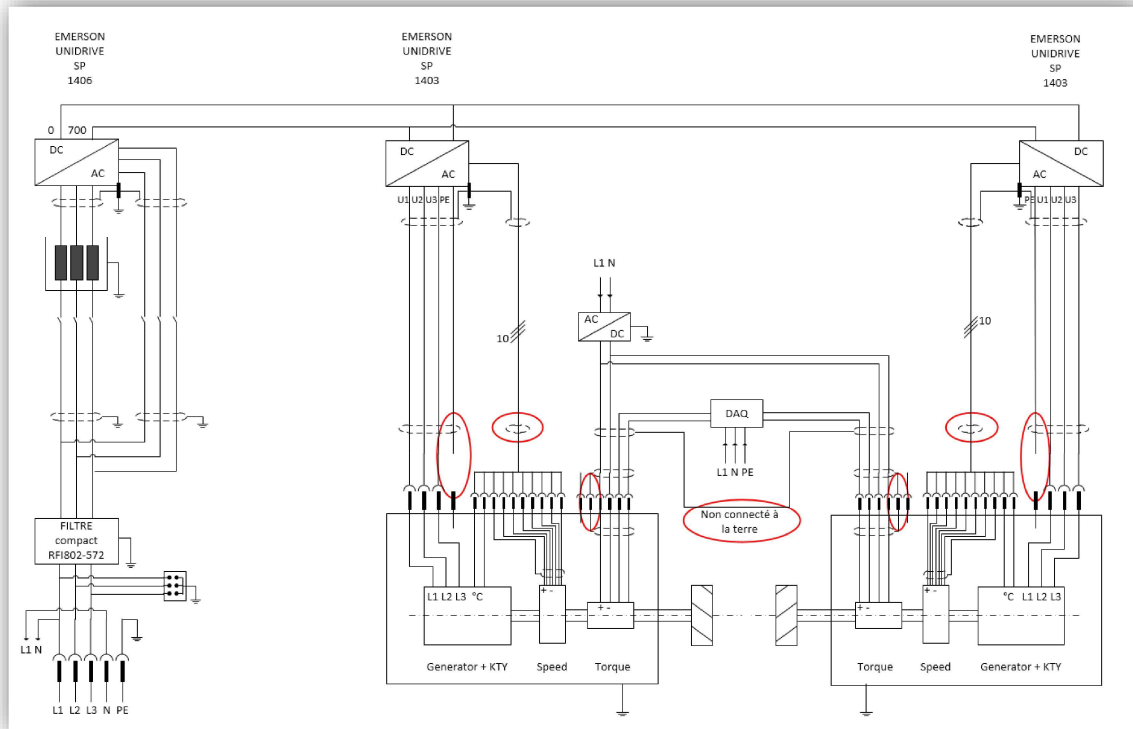


Figure 65: Schéma des terres et des blindages manquants

Les ellipses en rouge sur la figure ci-dessus montrent des situations problématiques. Pour y remédier, les blindages et terres des alimentations des génératrices ont été raccordés des deux côtés. La mesure après connexion de ces terres donne les résultats suivants.

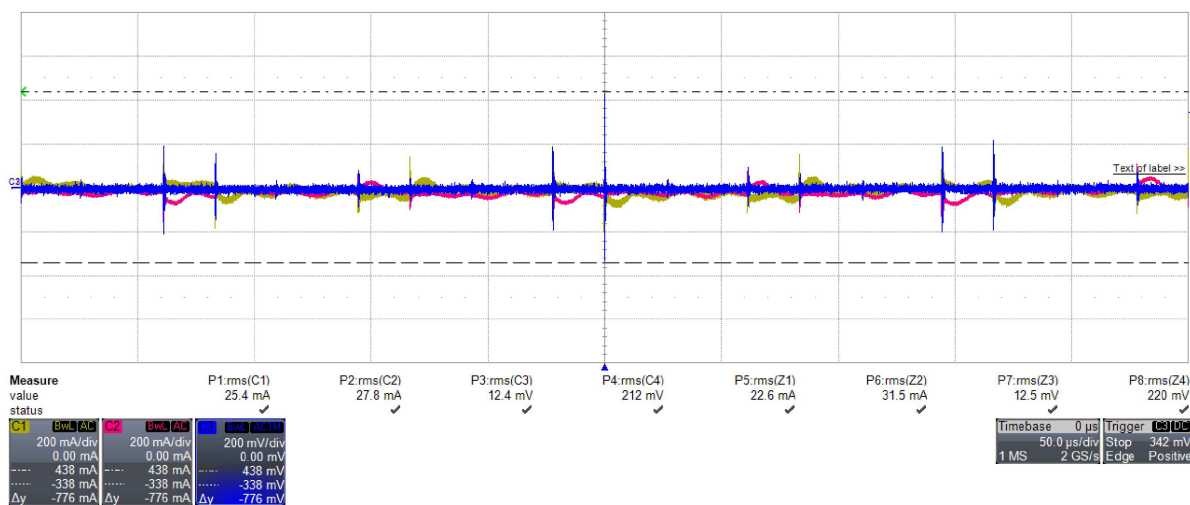


Figure 66: Mesure avec les terres et les blindages raccordés

Les canaux un et deux montrent le courant en mode commun circulant dans les câbles d'alimentation des génératrices tandis que le canal trois montre le signal du couplemètre. On constate que le bon raccordement de chaque terre et chaque blindage atténue grandement l'influence des perturbations.

Pour diminuer encore l'amplitude de ces perturbations, deux solutions de filtrages ont été envisagées. La première consistant à filtrer les signaux des capteurs et la deuxième à introduire un filtre à la sortie des convertisseurs.

Pour la première solution, différents filtres du marché ont été testés (Schurter 5500.2035, 5500.2031) sur le capteur de couple. Le but est de filtrer à une valeur supérieure à 100 [Hz], valeur permettant encore de visualiser les effets transitoires de couple mais atténuant grandement les fréquences de 12 [KHz] qui posent problème.

Les résultats pour le filtre de type 5500.2035 sont visibles ci-dessous.

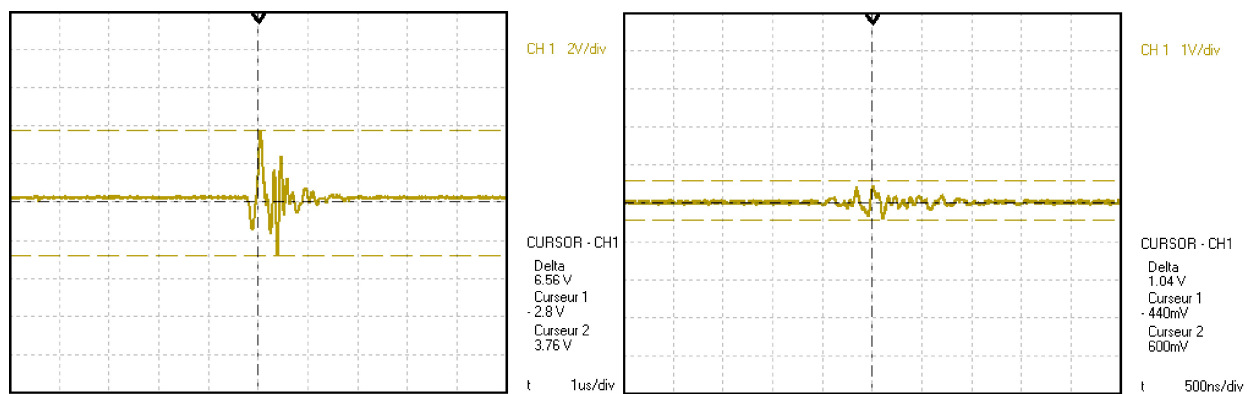


Figure 67: Mesure du couple au laboratoire électrique, filtre déclenché puis enclenché

On constate que l'amplitude du bruit a diminué d'un facteur ≈ 6.5 à 12 [KHz], ce qui correspond approximativement à l'atténuation de 20 [dB] à 10 [KHz] du filtre 5500-2035 (Annexe 8). Ce type de filtrage paraît donc réalisable et semble améliorer la qualité du signal.

Pour la deuxième solution, différents filtres en mode commun triphasé de chez Schaffner ont été testés (RD6137-6-7m5, RD6137-10-4m5, RD7137-10-6m6) ainsi qu'un prototype réalisé à l'école. Dans ce cas, le but est de contenir les bruits liés à la commutation des convertisseurs à l'intérieur de l'armoire de la μ -turbine. La Figure 68 montre les résultats pour le filtre (6137-6).

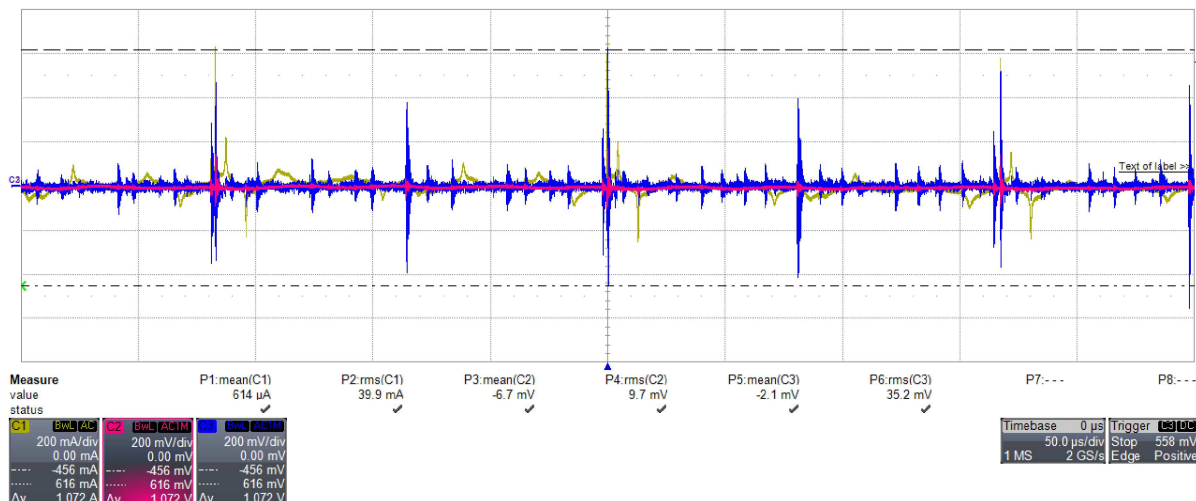




Figure 69: Câblage des filtres RD 61-37-10

Cette modification ainsi que la connexion définitive de la terre sur la génératrice restent encore à réaliser.

6.6 Tests

Dans un premier temps, la proposition de blinder le bus DC a été testée. La Figure 70 et la Figure 71 montrent l'influence du blindage.

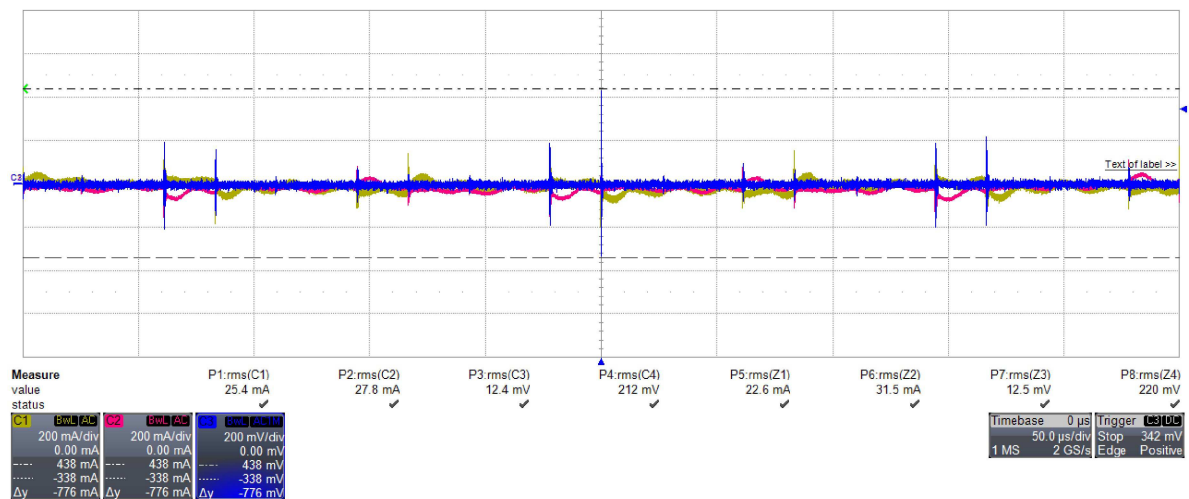


Figure 70: Mesure sans blindage du bus DC

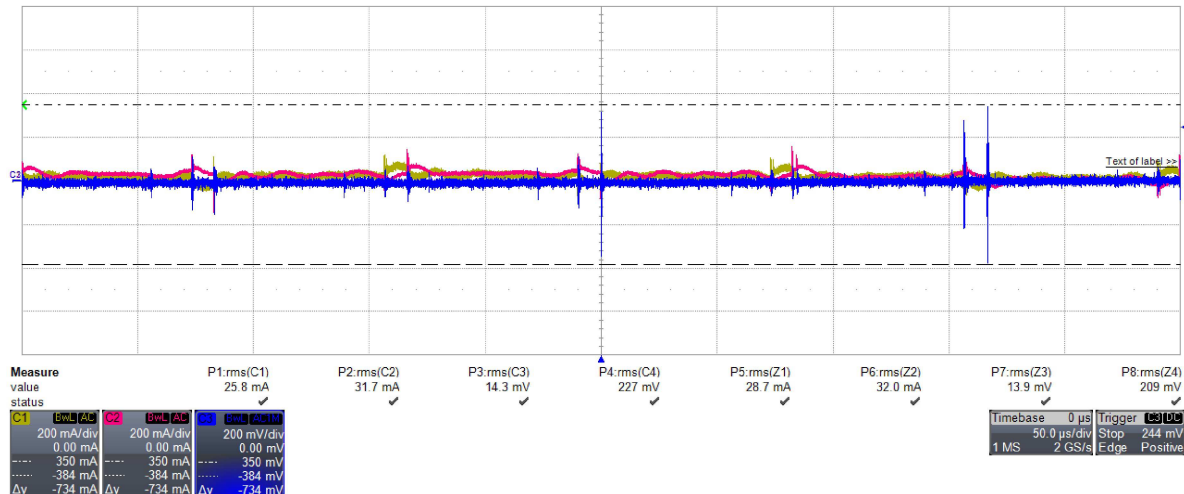


Figure 71: Mesure avec blindage du bus DC

On constate que dans cette situation, l'amélioration n'est pas notable.

La mesure a ensuite été prise en rajoutant les filtres.

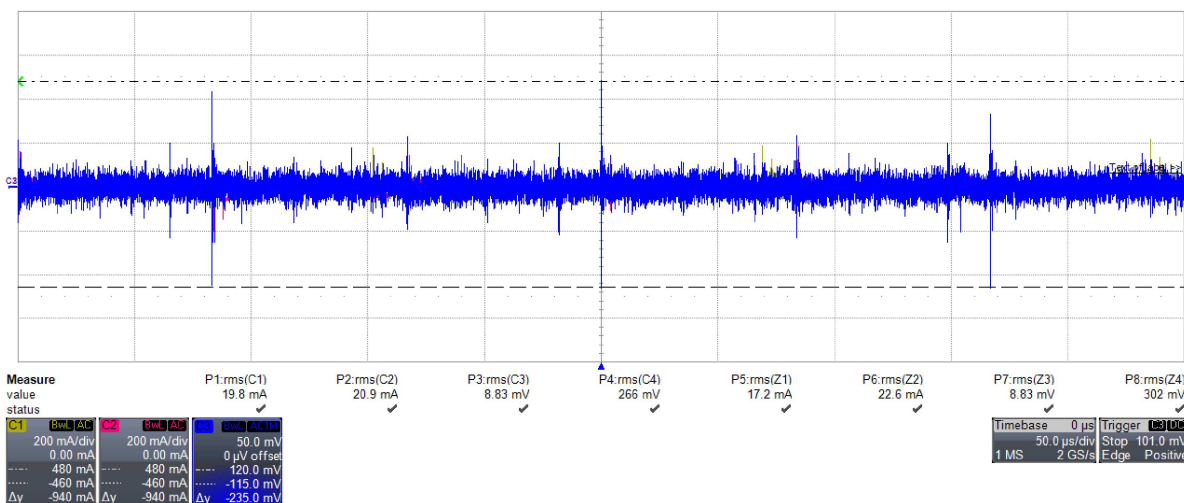


Figure 72: Mesure avec filtres et blindage du bus DC

On peut visualiser l'amplitude des pics sur le canal trois qui est réduite à 235 [mV]. L'atténuation totale présente donc un facteur 25.

Différentes mesures thermiques ont été effectuées pour vérifier les pertes des filtres. Les figures suivantes montrent les différentes températures après une heure de fonctionnement. Sur la Figure 73 on voit les deux filtres traversés respectivement par 1000 [W] et 750 [W].

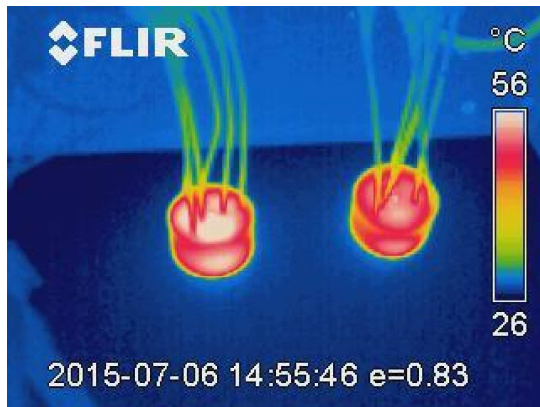


Figure 73: Mesure thermique des filtres



Figure 74: Mesure thermique de l'armoire

La température maximale admissible est de 110 [°C] selon le datasheet en (Annexe 9). On constate donc que la température reste bien en dessous de cette valeur. Sur la Figure 74, on perçoit que la température des filtres est proche de celle de l'inductance de réglage (à gauche).

7. Conclusion

Au début de ce travail de bachelor, la génératrice amont de la μ _turbine a été démontée pour être testée indépendamment. La conception d'un accouplement mécanique a permis de réaliser les tests hors de l'eau. Ses caractéristiques électriques ont ainsi pu être déterminées. Par la suite, les performances de la μ _turbine ont été mesurées sur le banc de test hydraulique de la Hes-so. Des instruments de mesures précis ont été installés pour enregistrer et tracer les puissances électriques et mécaniques. Celles-ci ont servi de base pour la modélisation numérique.

Les parties électriques des génératrices et de ses convertisseurs ont été modélisées à l'aide du logiciel SIMSEN. La μ _turbine a été décomposée en cinq parties, validées séparément grâce aux simulations, puis regroupées dans un seul modèle. Certains éléments sont encore perfectibles mais le modèle actuel est fonctionnel et complet, du point de vu structurel. Pour améliorer le modèle électrique, un ajustement des paramètres du bus DC et des pertes dans les IGBT pourrait être réalisé à condition de connaître exactement les caractéristiques des composants utilisés. La caractéristique hydraulique en fonction du débit et de la vitesse a été liée au modèle à l'aide d'une fonction délivrant le couple mécanique. Elle ne permet cependant pas de simuler les effets dans la conduite. Un modèle hydraulique détaillé devra être réalisé. Les modèles hydraulique et électrique pourront ensuite être regroupés pour réaliser le modèle d'ensemble. Sur la base des mesures effectuées, les couples de frottements des roulements pourraient également être pris en compte.

Concernant les perturbations sur les capteurs de mesure, une analyse des signaux électriques a permis de déterminer les sources des perturbations. Les convertisseurs des génératrices faisaient, avant l'ajout de filtres, circuler des courants en mode commun dans les câbles d'alimentation des génératrices. Ceux-ci engendraient des perturbations électromagnétiques qui influençaient les différents capteurs. L'ajout de filtres en mode commun en sortie des convertisseurs ainsi que le raccordement des terres et blindages ont apportés une très nette amélioration de la qualité des signaux de mesures.

8. Remerciements

Je tiens à remercier :

Monsieur Samuel Chevailler pour m'avoir suivi tout au long de ce travail et pour m'avoir assisté dans mes recherches.

L'assistante Shadya Gabathuler pour le temps passé à m'aider sur la μ _turbine et sur Matlab.

L'adjoint scientifique Vlad Hasmatuchi pour l'aide lors des essais sur le banc de test hydraulique.

L'assistant Sylvain Richard pour l'aide apporté sur Simsen.

Merci aussi à l'atelier mécanique de la HES-SO pour la précision et la rapidité d'exécution des pièces usinées, à l'entreprise Power-Vision pour avoir pris le temps de répondre à mes nombreuses questions à propos du logiciel de simulation Simsen. Ainsi qu'à Blaise Evéquoz et Alain Germanier pour la configuration des appareils de mesures (Zimmer).

9. Signature et date

Grange Mathieu

Sion, le 10 juillet 2015

10. Référence

- [1] OFEN, «Perspektiven für die Grosswasserkraft in der Schweiz,» 2013.
- [2] HES-SO, «Micro turbine bulbe,» Sion, 2013.
- [3] D. Melly, «Dimensionnement des génératrices,» Sion, 2013.
- [4] H. Bühler, Réglage de systèmes d'électronique de puissance, Lausanne, 1999.
- [5] L. Rapillard, Cours de statique, HES-SO Valais Sion, 2009.
- [6] F. Butzberger, H.-P. Biner et J.-D. Marcuard, Mécatronique 1 Mesure-Commande-Régulation, Hes-so Sion, 2012.

11. Table des annexes

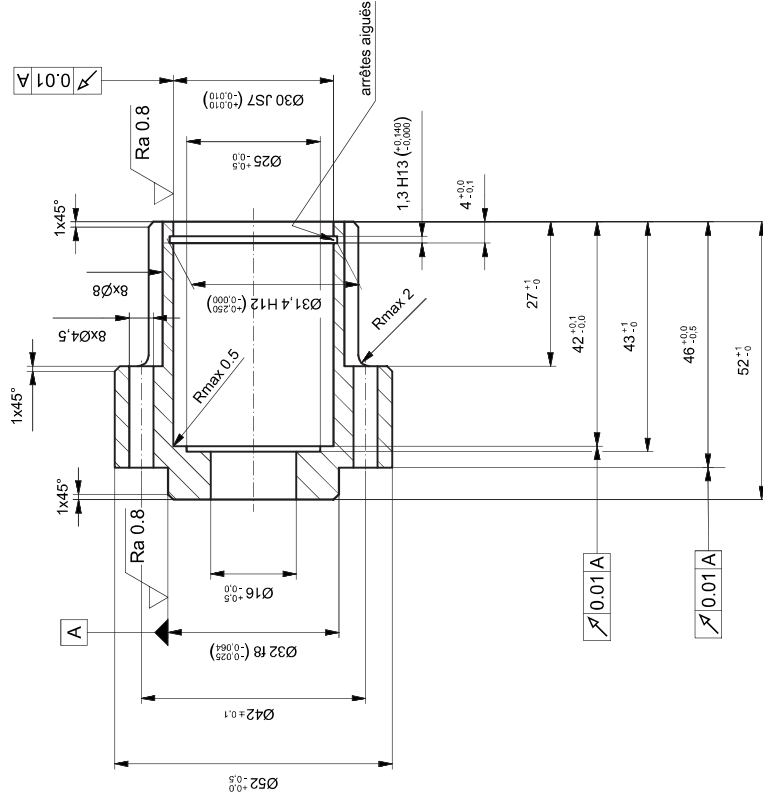
Annexe 1	:	Mise en Plans Inventor
Annexe 2	:	Schéma de câblage du Zimmer LMG 500
Annexe 3	:	Données mise en forme (format standard)
Annexe 4	:	BEP des roues Simulé : extrait du rapport « New CounterTurbine for Drinking Water Systems »
Annexe 5	:	NCTE couplemètre datasheet
Annexe 6	:	IED Codeur incrémental datasheet
Annexe 7	:	Accouplement magnétique et sa linéarisation
Annexe 8	:	Filtres Schurter 5500 datasheet
Annexe 9	:	Filtre Schaffner Common mode Chokes RD séries datasheet
Annexe 10	:	Schéma détaillé de la micro turbine
Annexe 11	:	Schéma global du banc de test hydraulique
Annexe 12	:	Calibration des couplemètres

Annexe 1

Mise en plans Inventor

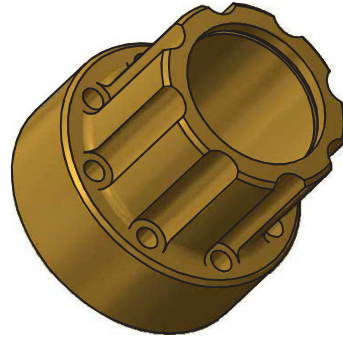
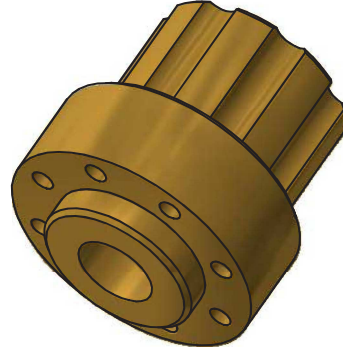
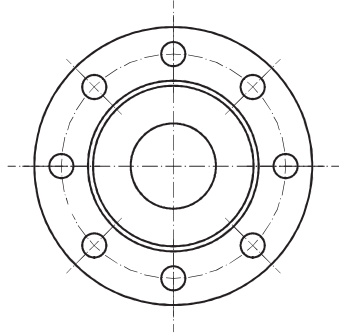
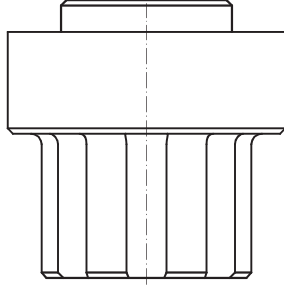
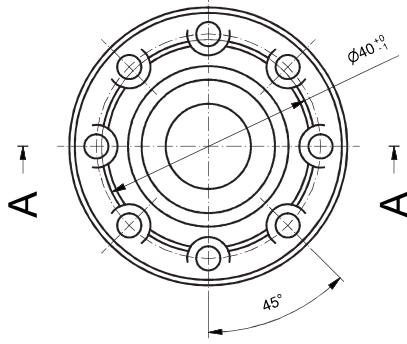
- Vue générale palier
- Carter roulements
- Arbre Accouplement
- Douille intérieur
- Entretoise
- Douille serrage

A-A




Tolérances générales ISO2768-mk

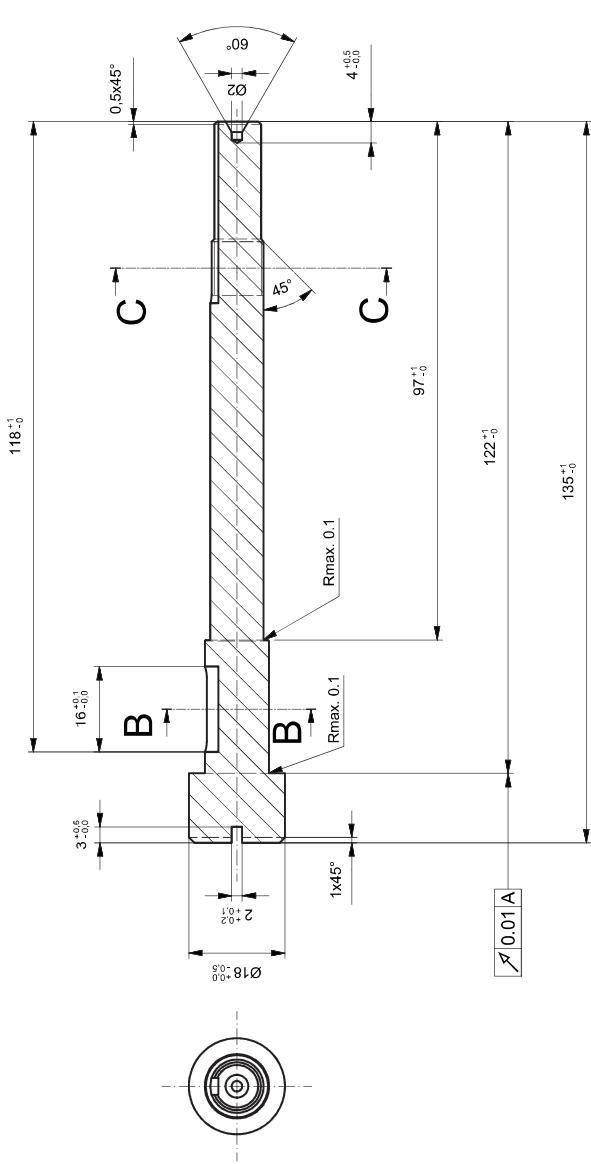
Ra 3.2
Chanfrein 0.2x45°



P301_02		1	Laiton	Carter Roulement			
Pos.	Quantité	Matière	Dénomination / Caractéristiques				
Pos.	Menge	Werkstoff	Benennung / Merkmale				
Microturbine Bulbe			Dessiné	Christian Cachelin	04.03.2015	Echelle Massstab	
Carter Roulement			Gezeichnet			1:1	
Fichier			Contrôle				
Datei			Geprüft				
			P301_02				

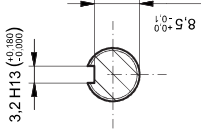
**Hes-so**

VALAIS
WALLIS



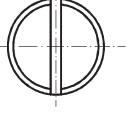
B-B

C-C



4 JS9 (±0.015)

3.2 H13 (±0.188 / ±0.200)



4 ±0.5

60°

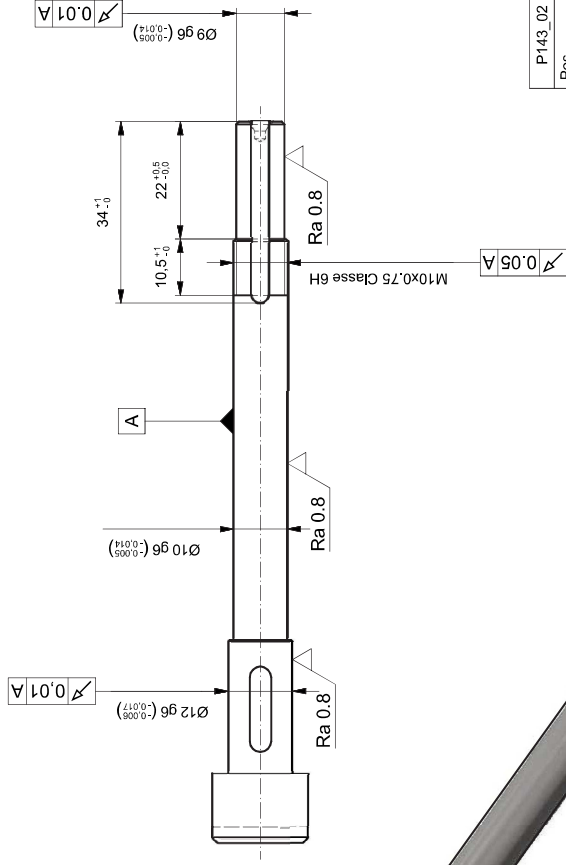
0.01 A



Tolérances générales ISO 2768-m

Ra 3.2 (✓)

Chanfrein 0.2x45°



Ø12 g6 (-0.006 / -0.017)

0.01 A

A

Ø10 g6 (-0.005 / -0.014)

0.05 A

34 ±1

10.5 ±1

22 ±0.5

Ø9 g6 (-0.014 / -0.025)

0.01 A

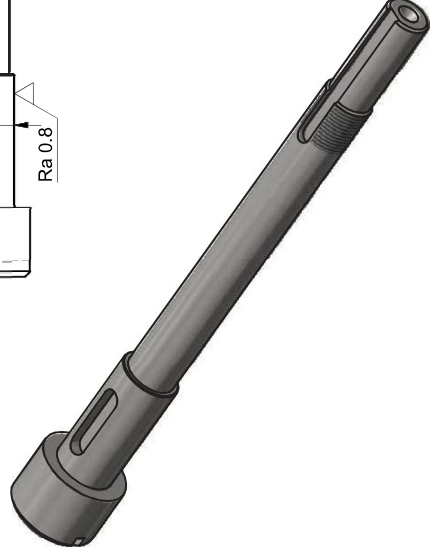
0.05 A

M10x0.75 Classe 6H

Ra 0.8

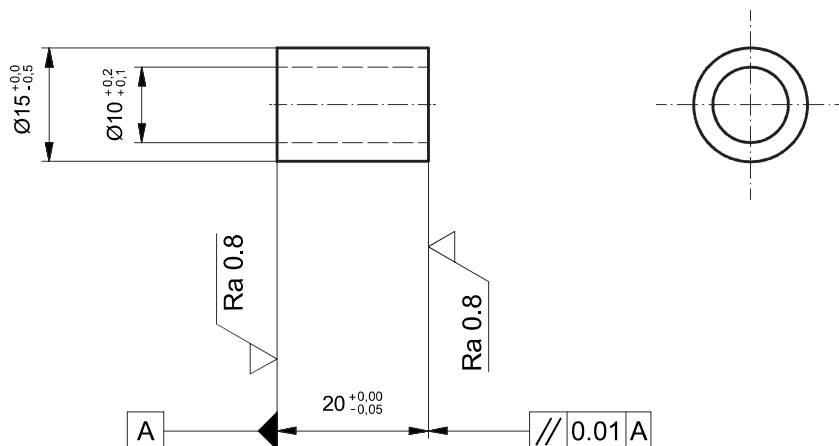
Ra 0.8

Ra 0.8

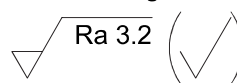


P143_02	1	Acier inoxydable	Arbre accouplement
Pos.	Quantité	Matière	Dénomination / Caractéristiques
Pos.	Menge	Werkstoff	Benennung / Merkmale
Microturbine Bulbe		Dessiné	
Arbre accouplement		Gezeichnet	
Fichier		Christian Cachelin	
Datei		03.03.2015	
		Echelle	
		Massstab	
		1:1	
		P143_02	

Hes-so VALAIS WALLIS

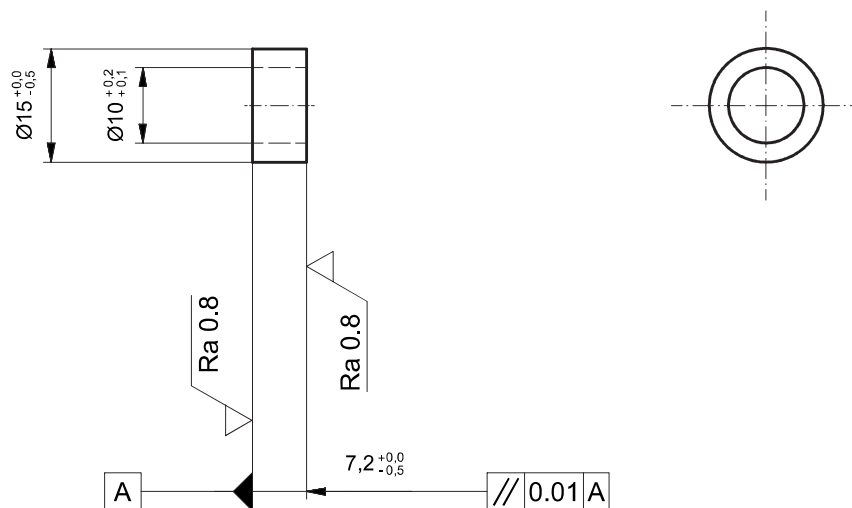


Tolérances générales ISO 2768-mk

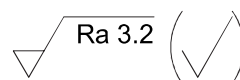


Chanfrein 0.2x45°

P303_02	1	Laiton	Douille Intérieur			
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale			
Microturbine Bulbe Douille Intérieur					Dessiné Gezeichnet	Christian Cachelin
					Contrôlé Geprüft	04.03.2015
Fichier Datei					Echelle Massstab 1:1	
Hes·so VALAIS WALLIS					P303_02	

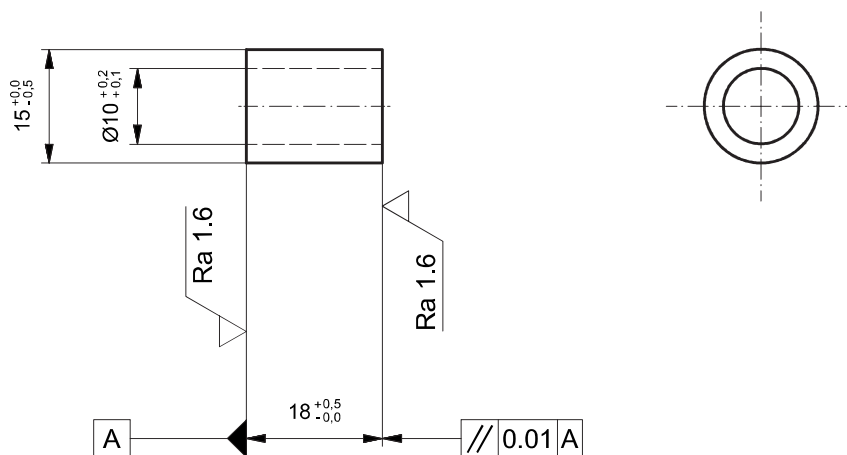


Tolérances générales ISO2768-mk




Chanfrein 0.2x45°

P306-02	1	Laiton / Messing	Entretoise		
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale		
Microturbine Bulbe Entretoise			Dessiné Gezeichnet	Christian Cachelin	04.03.2015
			Contrôlé Geprüft		
Fichier Datei			Echelle Massstab 1:1		
Hes-so VALAIS WALLIS			P306_02		



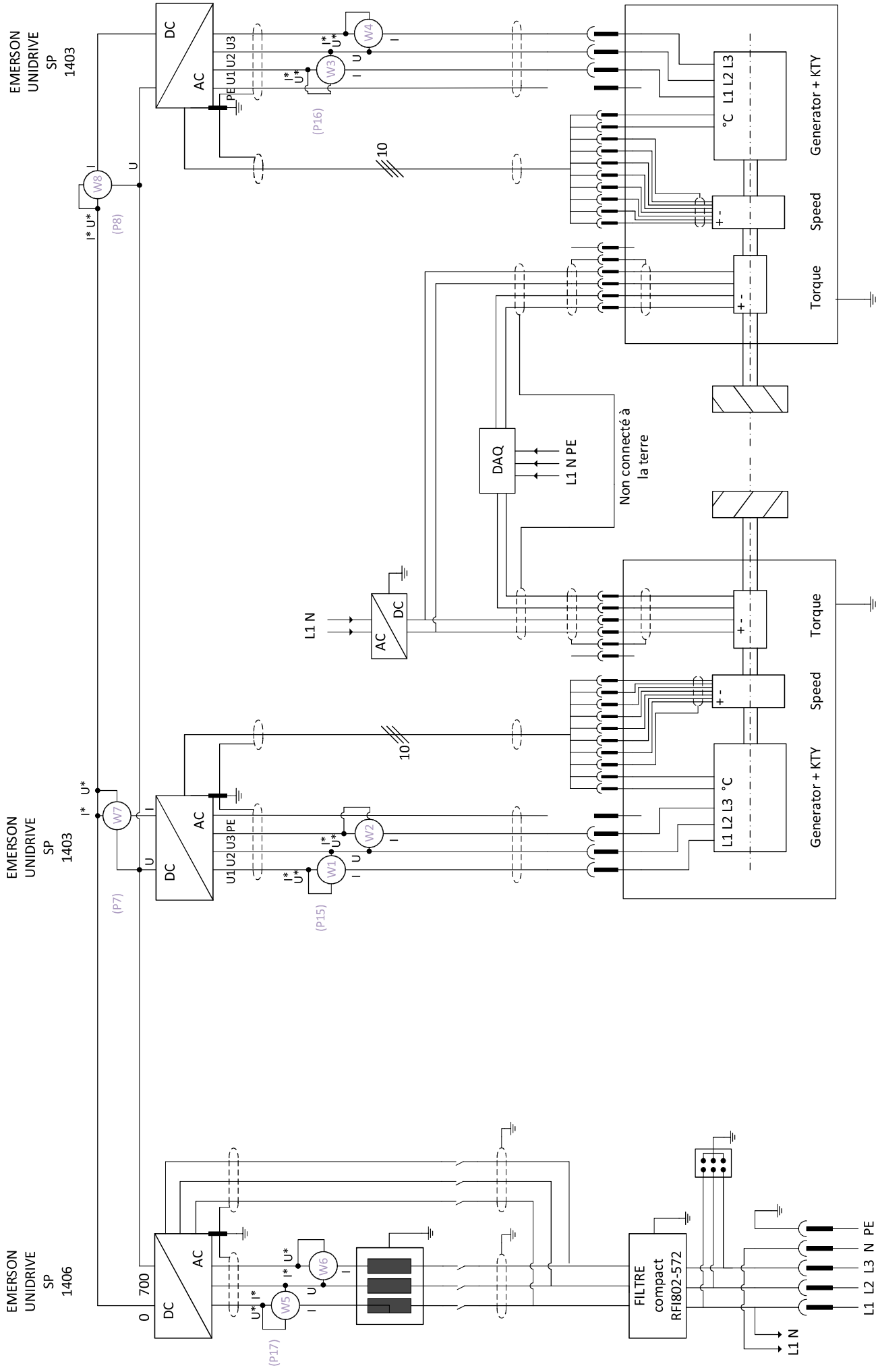
Tolérances générales ISO 2768-mk

Ra 3.2
 Chanfrein 0.2x45°

P307-02	1	Laiton / Messing	Douille serrage			
Pos. Pos.	Quantité Menge	Matière Werkstoff	Dénomination / Caractéristiques Benennung / Merkmale			
Microturbine Bulbe Douille Serrage			Dessiné Gezeichnet	Christian Cachelin	04.03.2015	Echelle Massestab
			Contrôlé Geprüft			1:1
Fichier Datei						
<div><div>Hes-so</div><div> VALAIS WALLIS</div></div>			P307-02			

Annexe 2

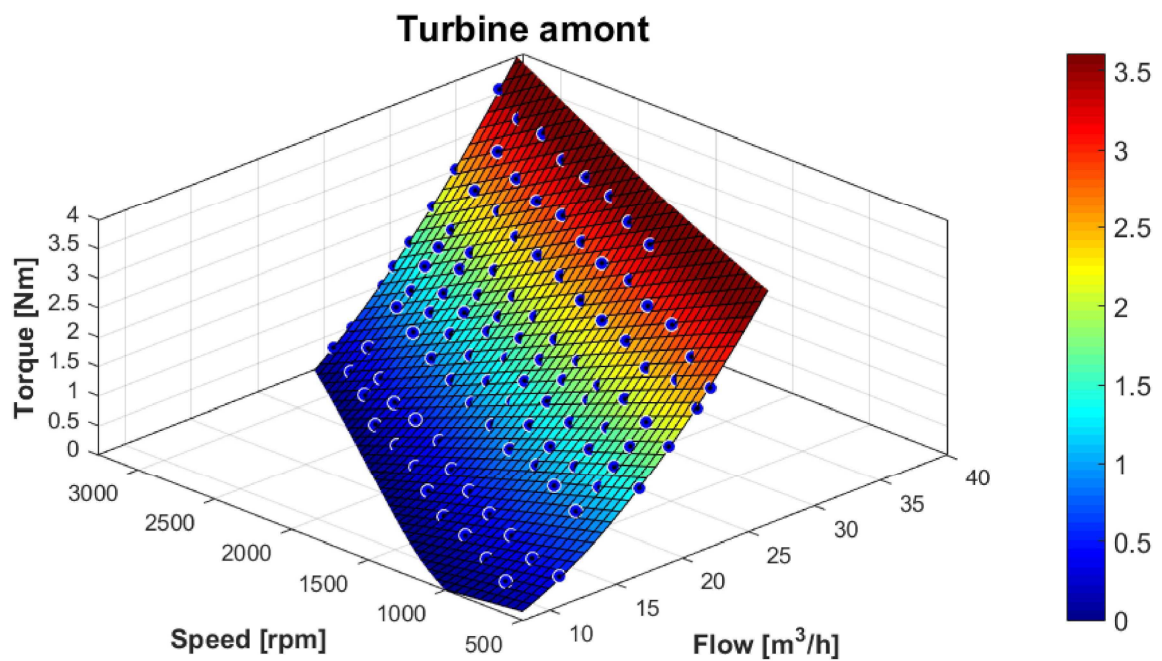
Schéma de câblage du Zimmer
LMG 500



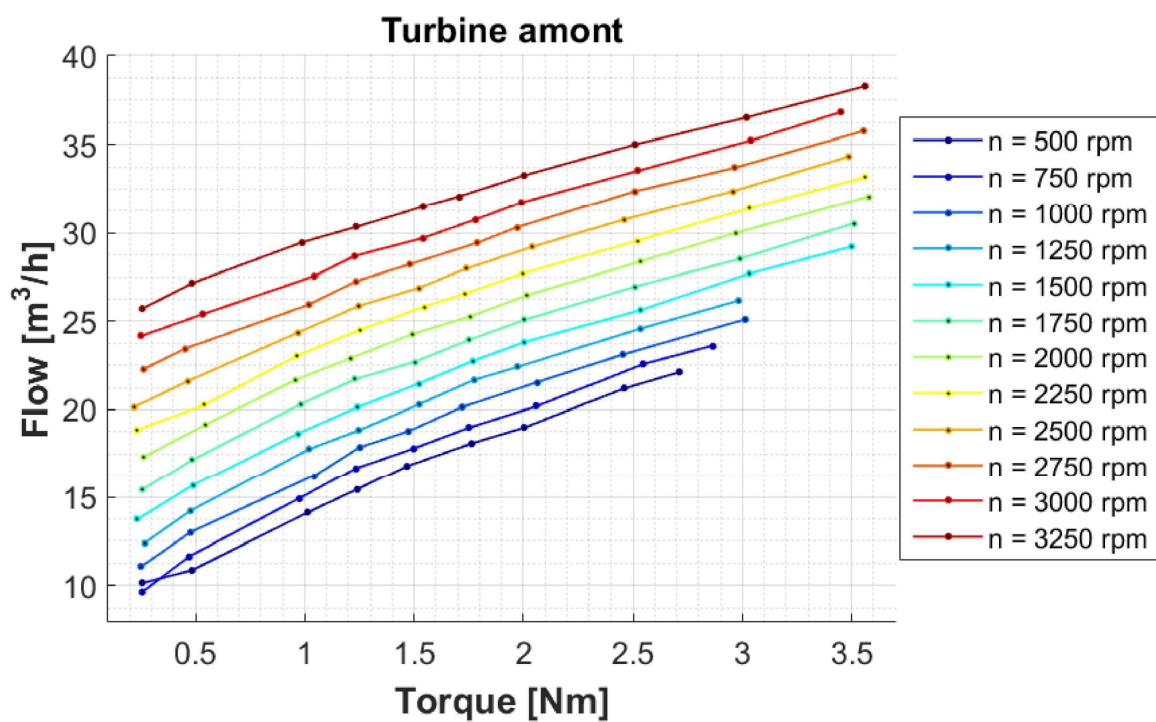
Annexe 3

Données mise en forme (format standard)

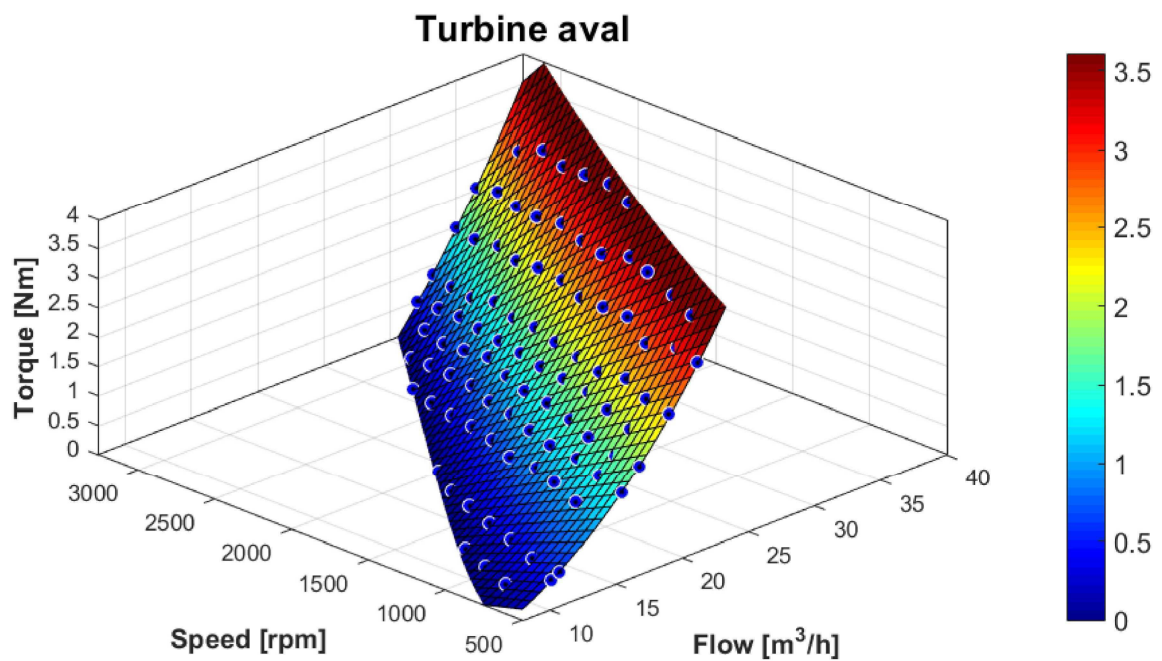
- Mesures points de fonctionnements 1-6
- Mesures fondamentales 7-25
- Mesures harmoniques 26-44



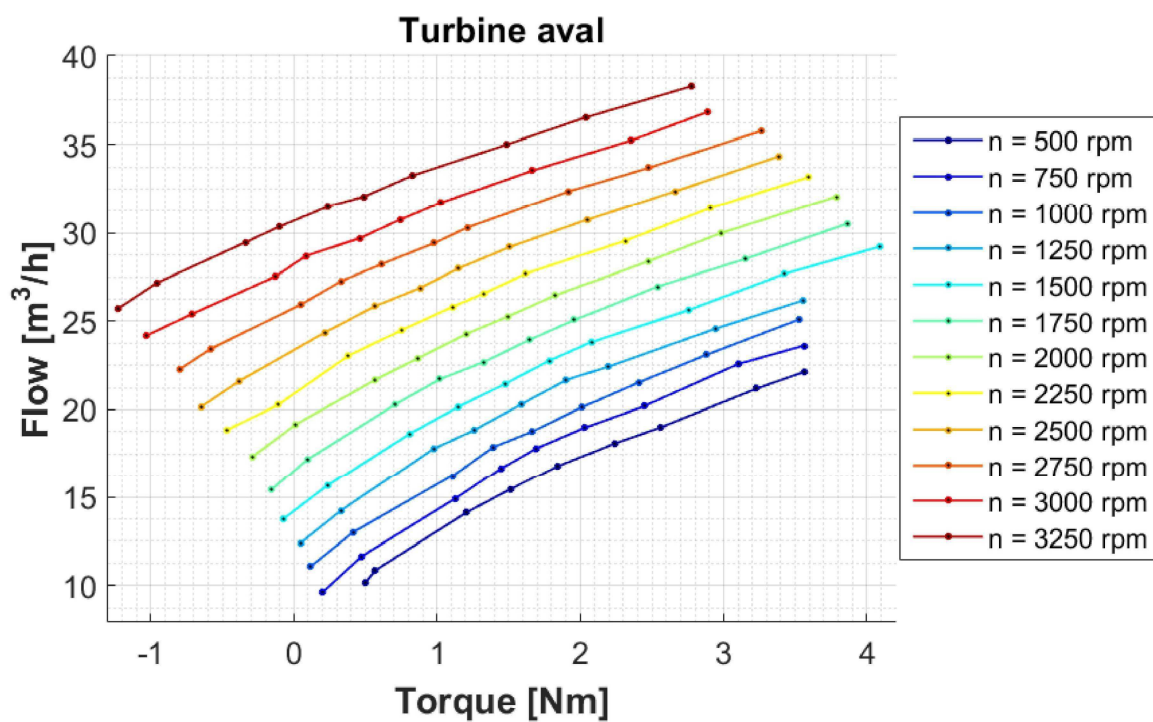
d3) en i a i ératn en atnr te émp i é d u



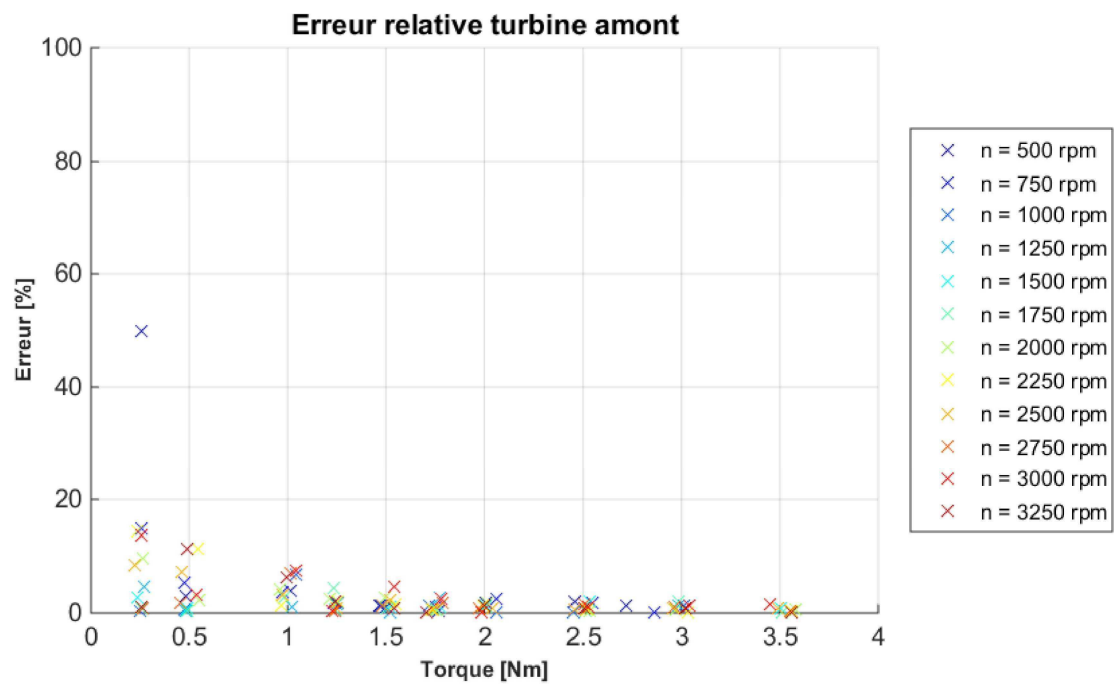
d3 é n e i a i éroé n enr te émp i é r d u



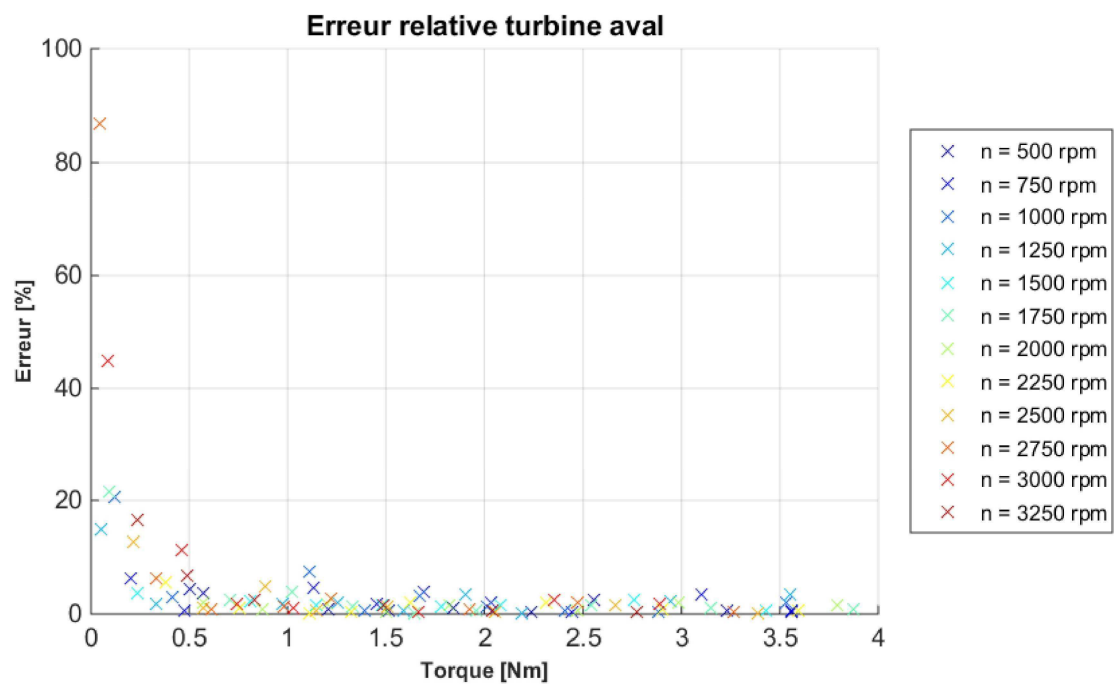
3) *Extrapolation quadratique turbine aval 3D*



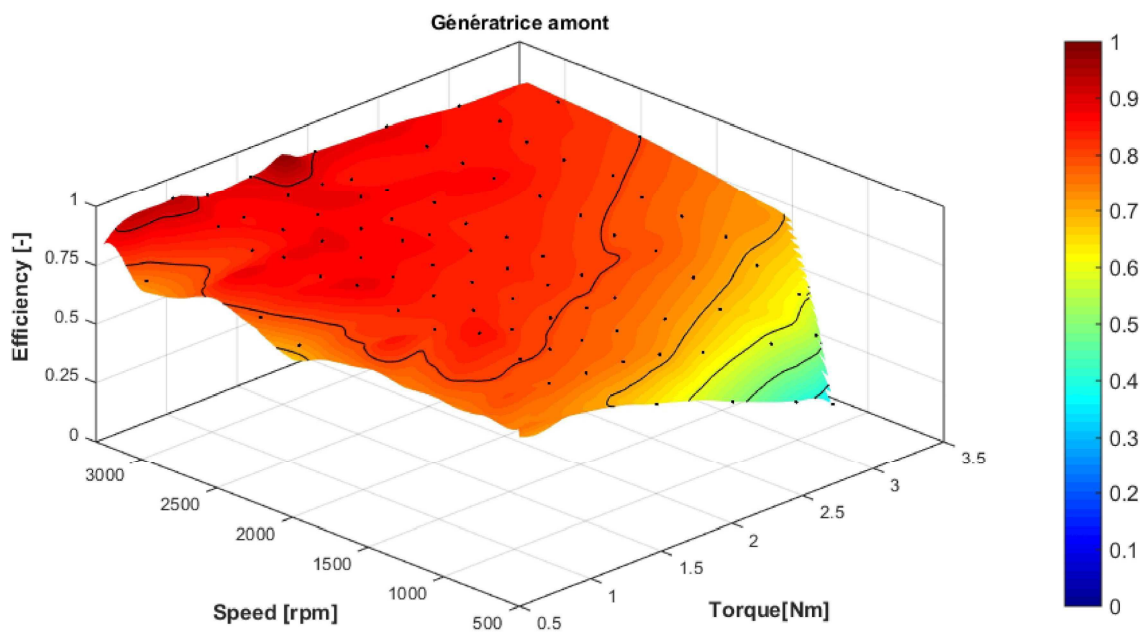
4) *Interpolation linéaire turbine aval 2D*



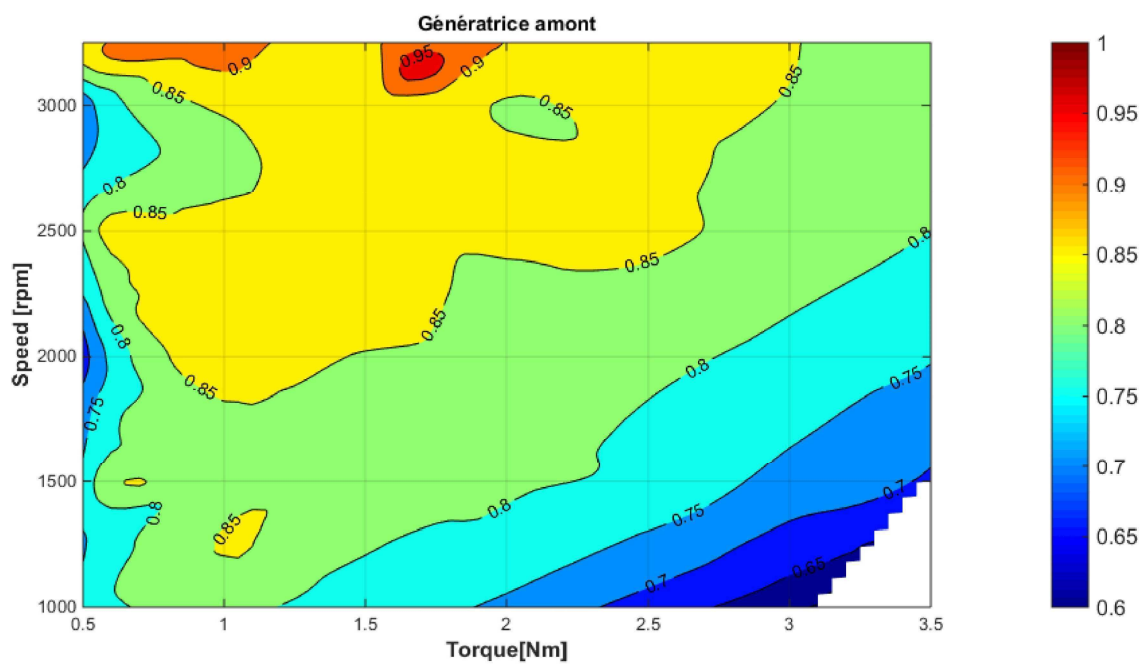
5) Erreur relative de l'extrapolation sur la turbine amont



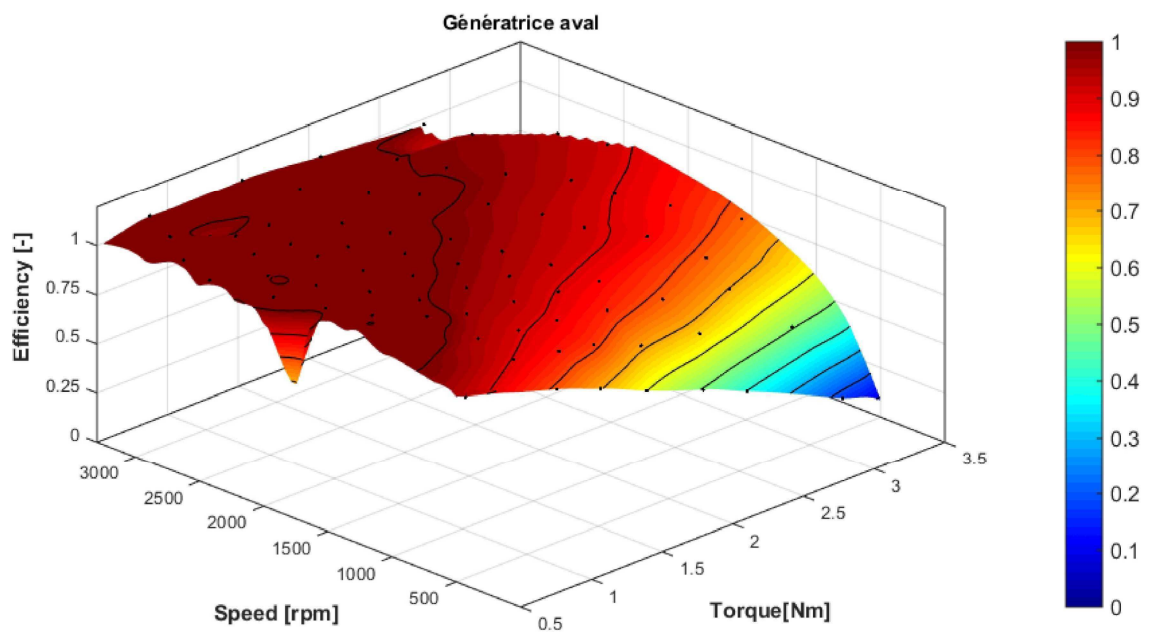
6) Erreur relative de l'extrapolation sur la turbine aval



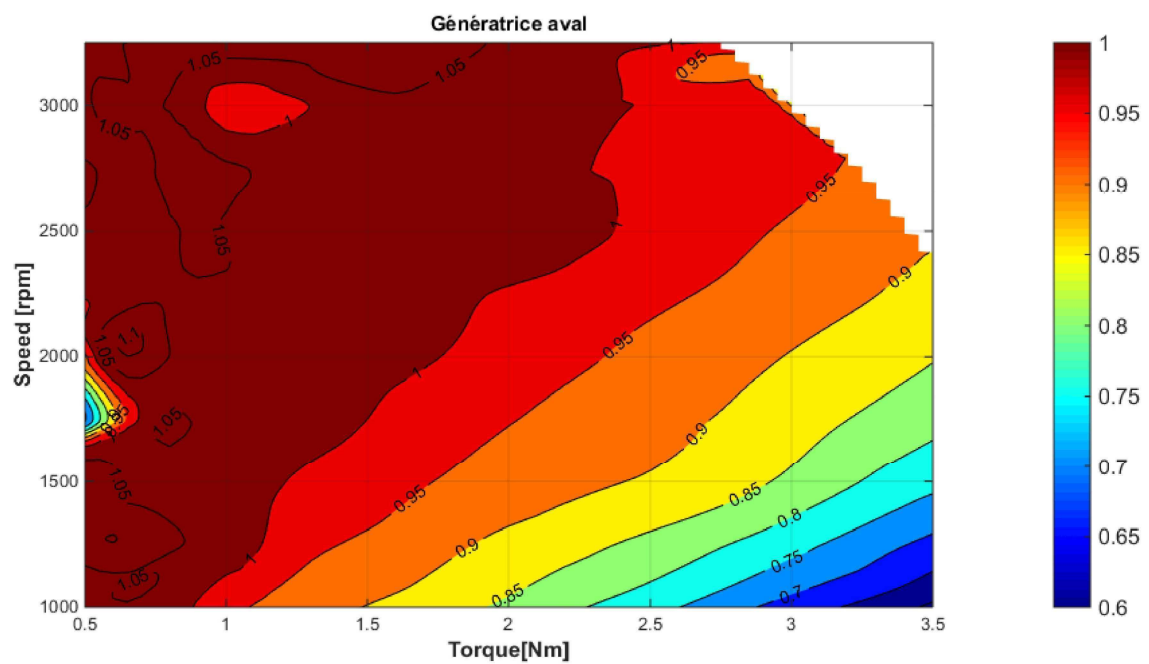
7) Rendement de la génératrice amont 3D



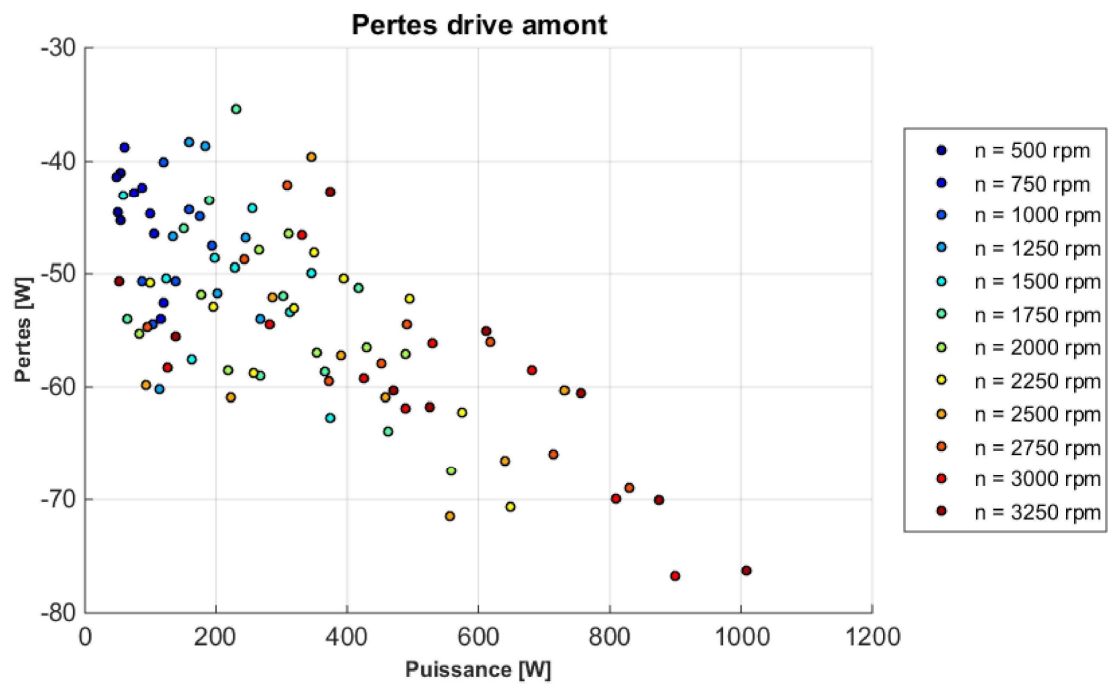
8) Rendement de la génératrice amont 2D



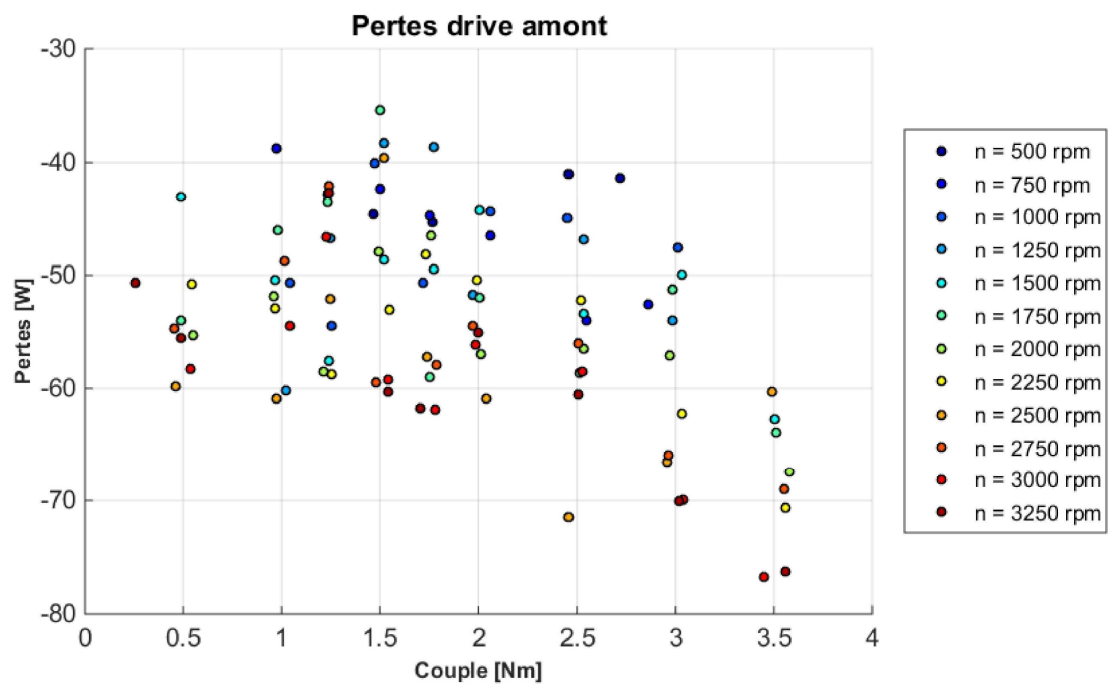
9) Rendement de la génératrice aval 3D



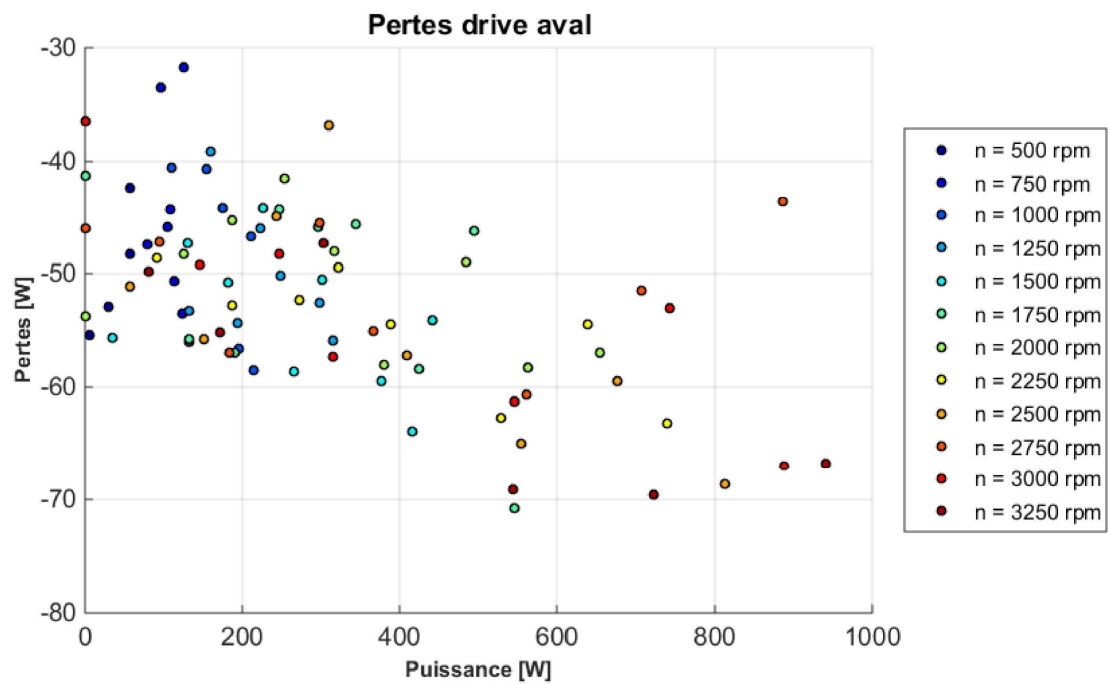
10) Rendement de la génératrice aval 2D



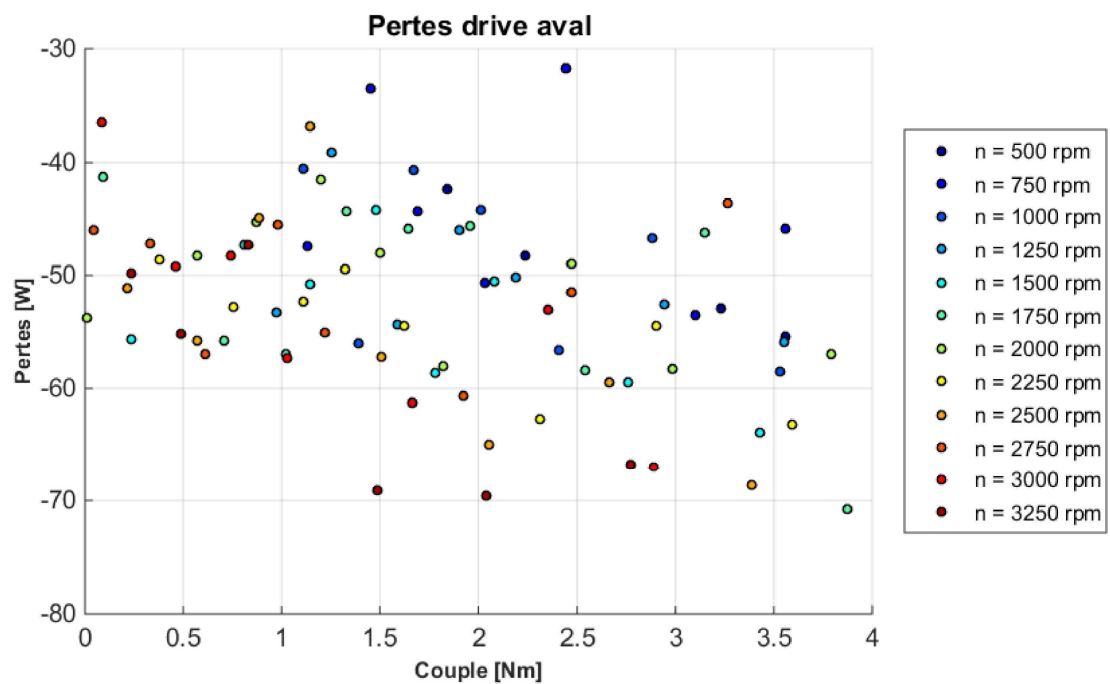
11) Pertes en fonction de la puissance drive amont



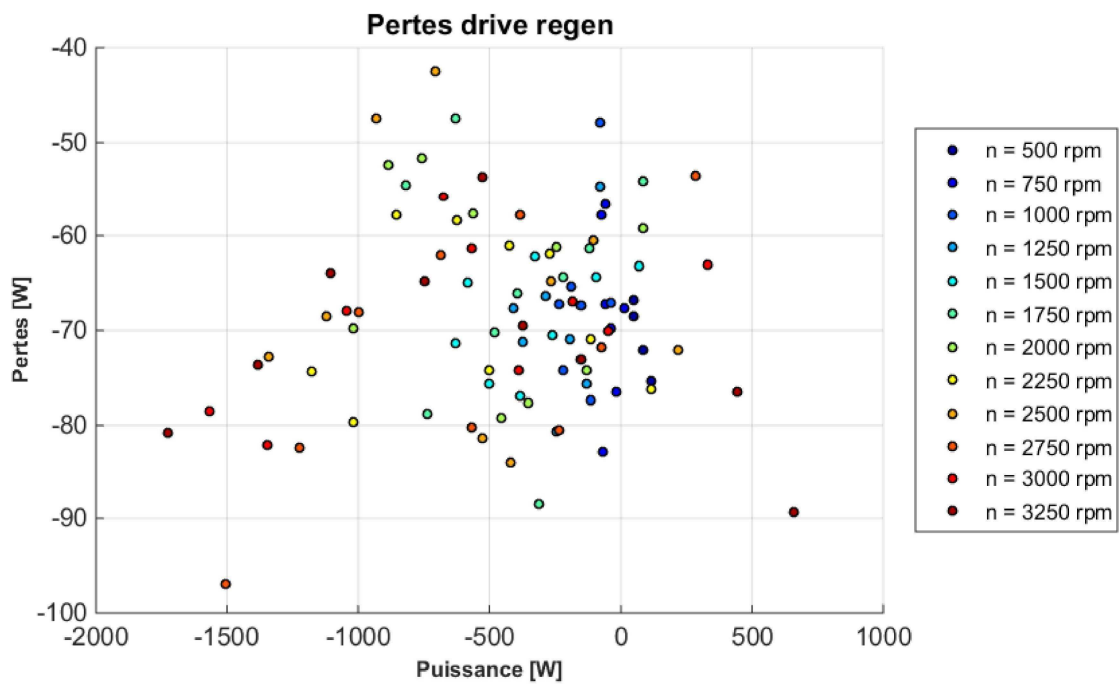
12) Pertes en fonction du couple drive amont



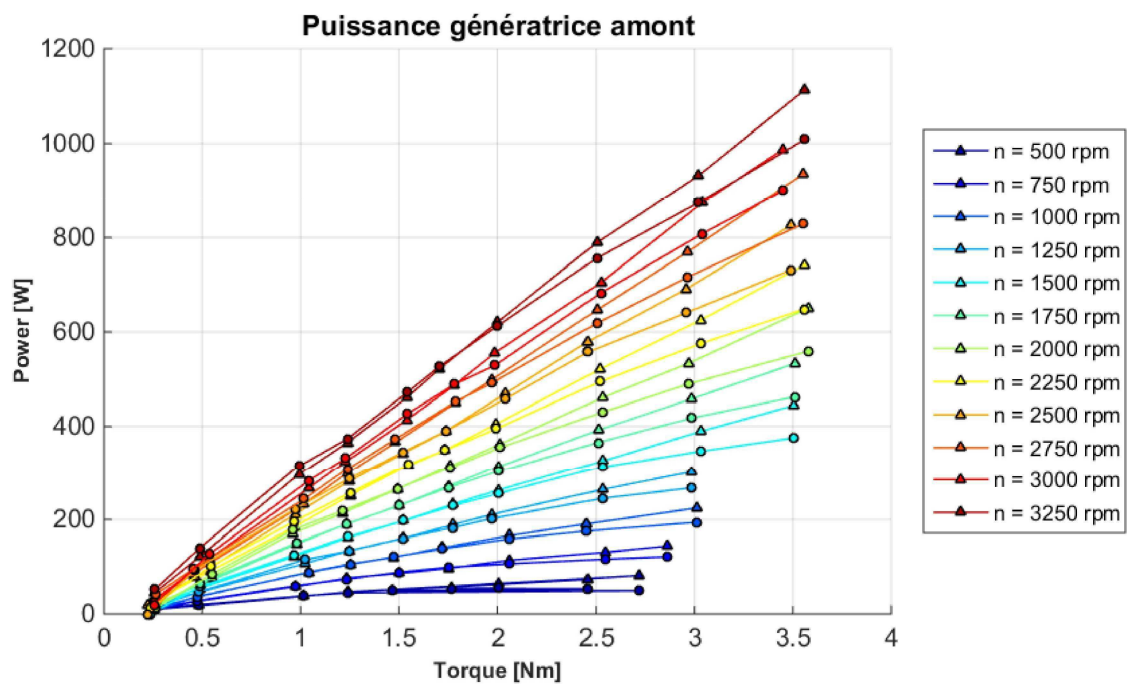
13) Pertes en fonction de la puissance drive aval



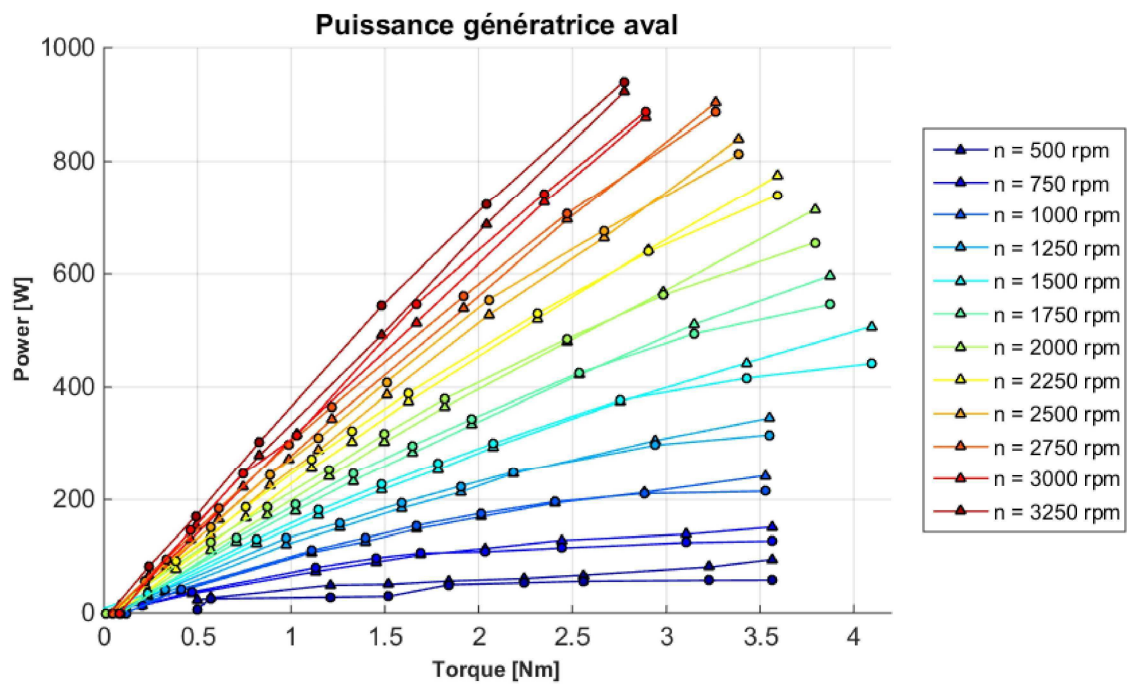
14) Pertes en fonction du couple drive aval



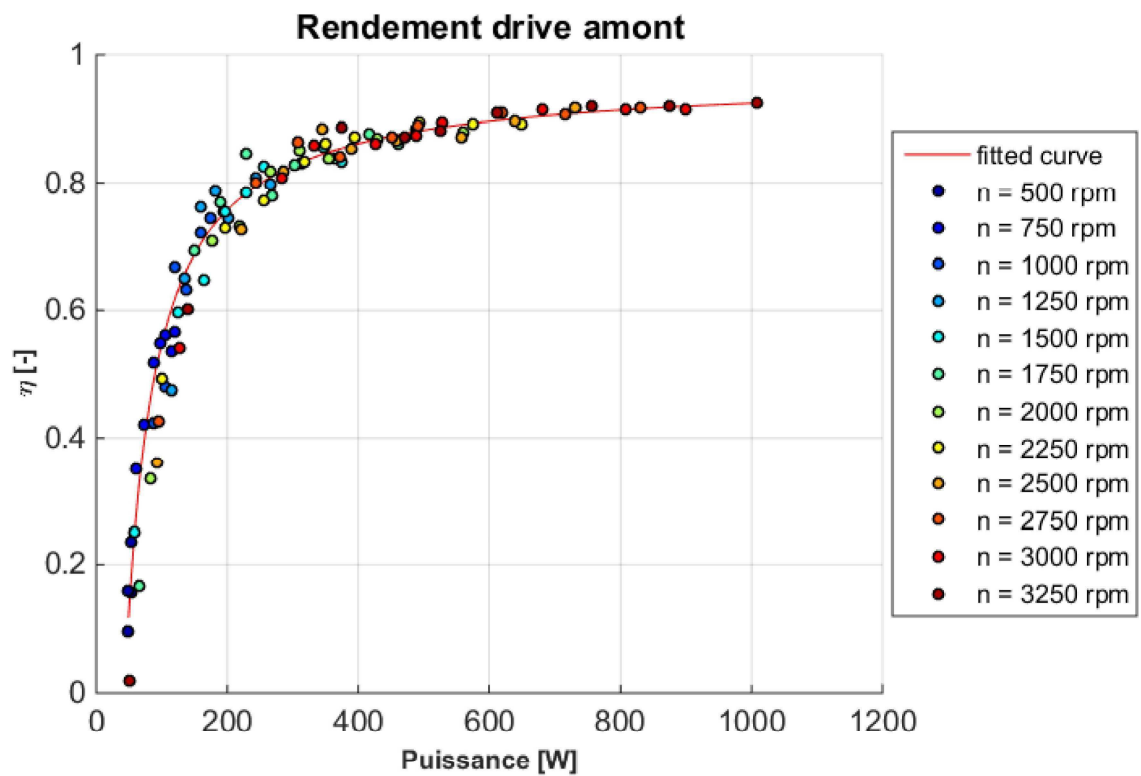
15) Pertes en fonction de la puissance drive regen



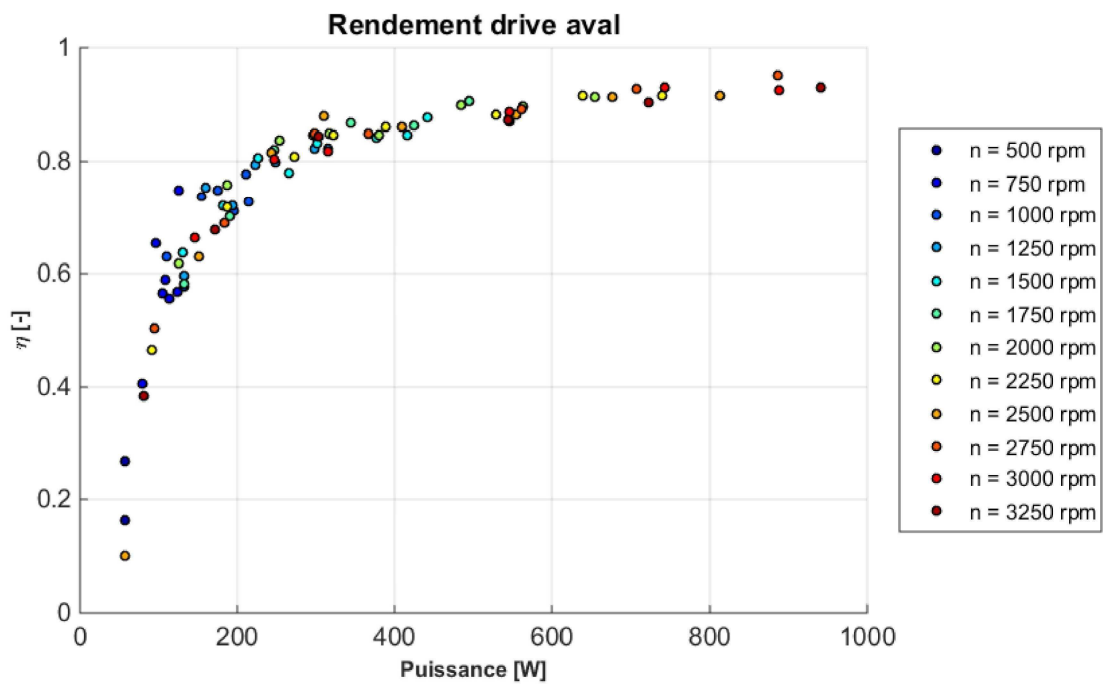
16) Puissance génératrice amont (comparaison entre le retour du convertisseur et la mesure)



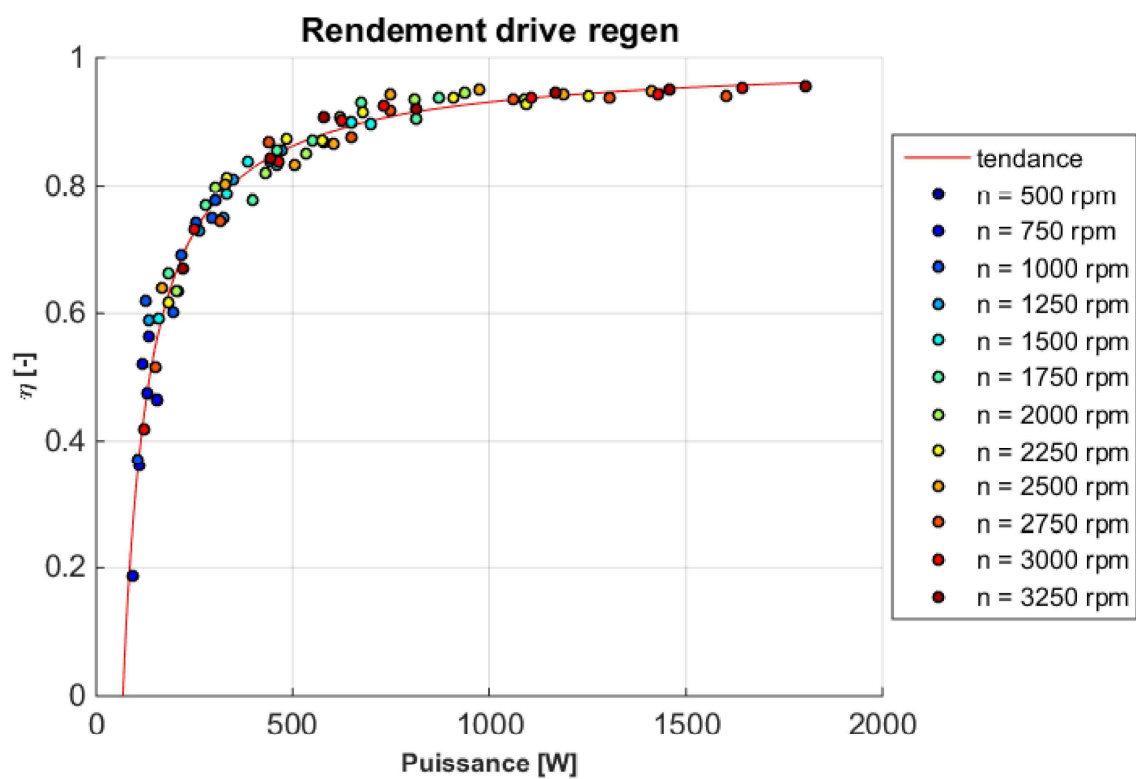
17) *Puissance génératrice aval (comparaison entre le retour du convertisseur et la mesure)*



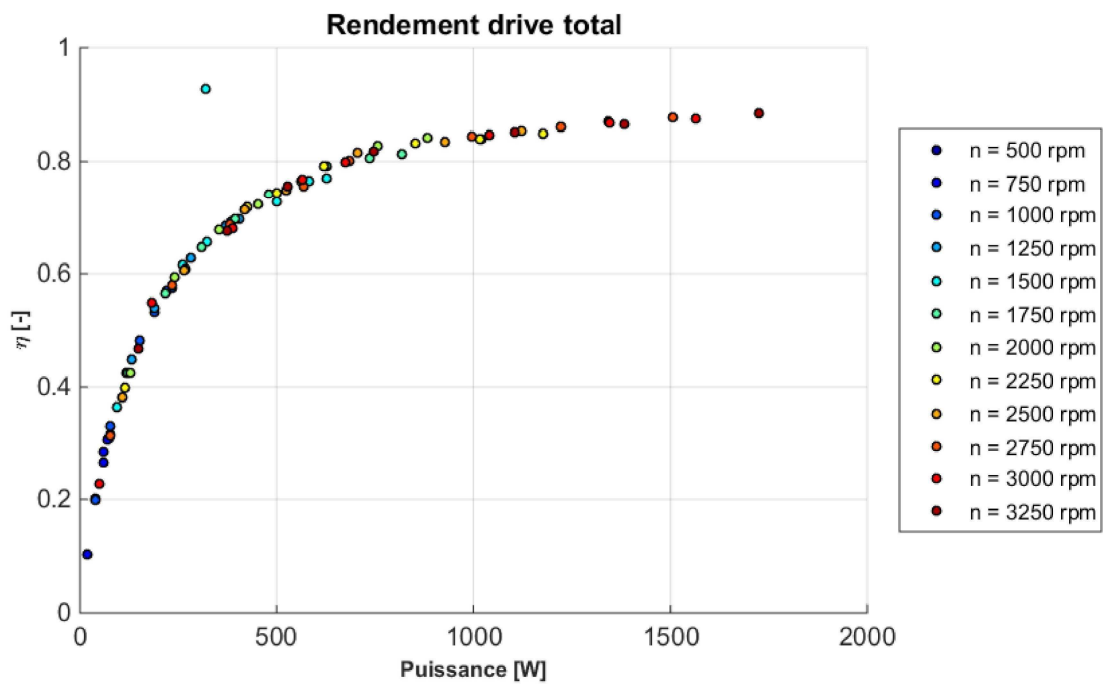
18) *Rendement drive amont 2D*



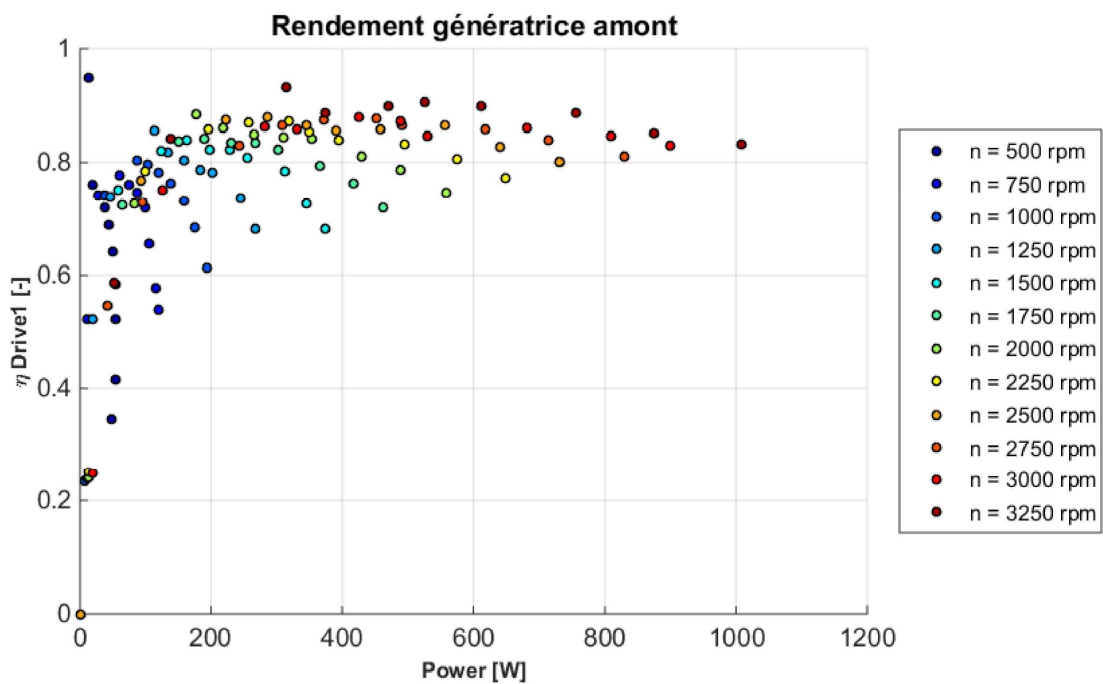
19) Rendement drive aval 2D



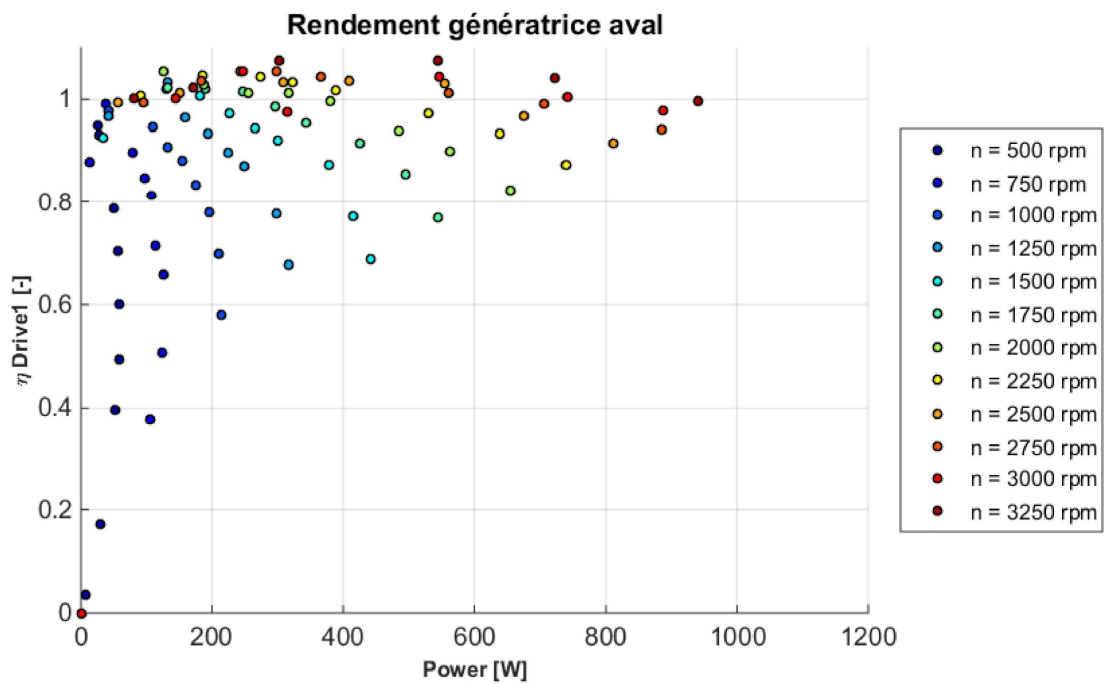
20) Rendement drive regen 2D



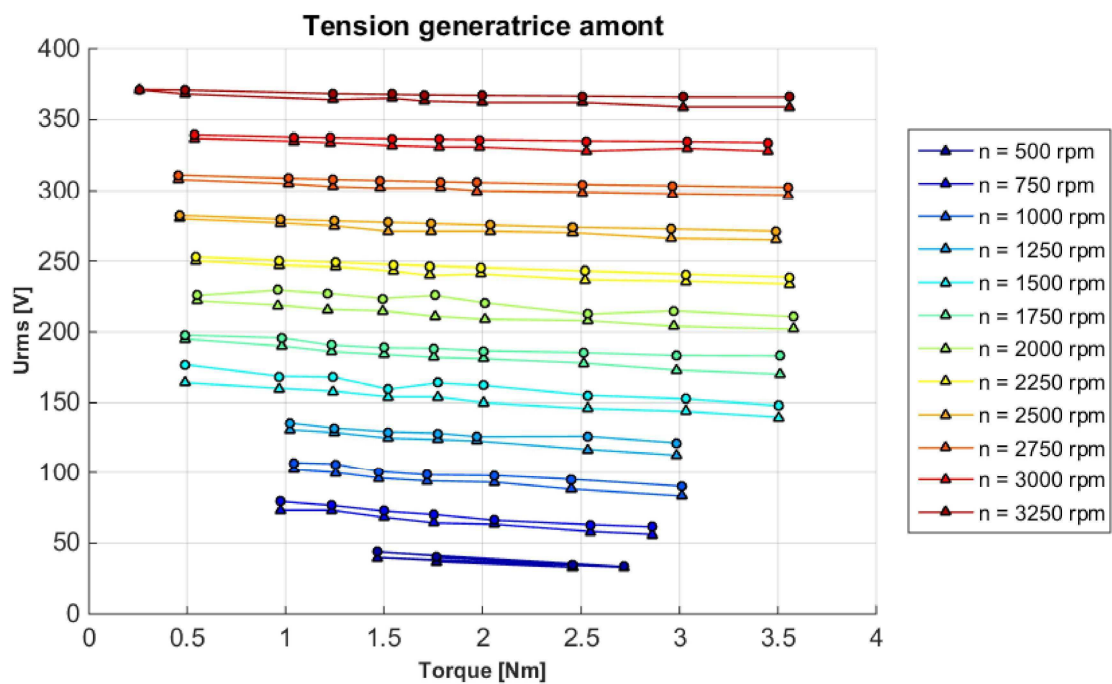
21) Rendement total des convertisseurs 2D



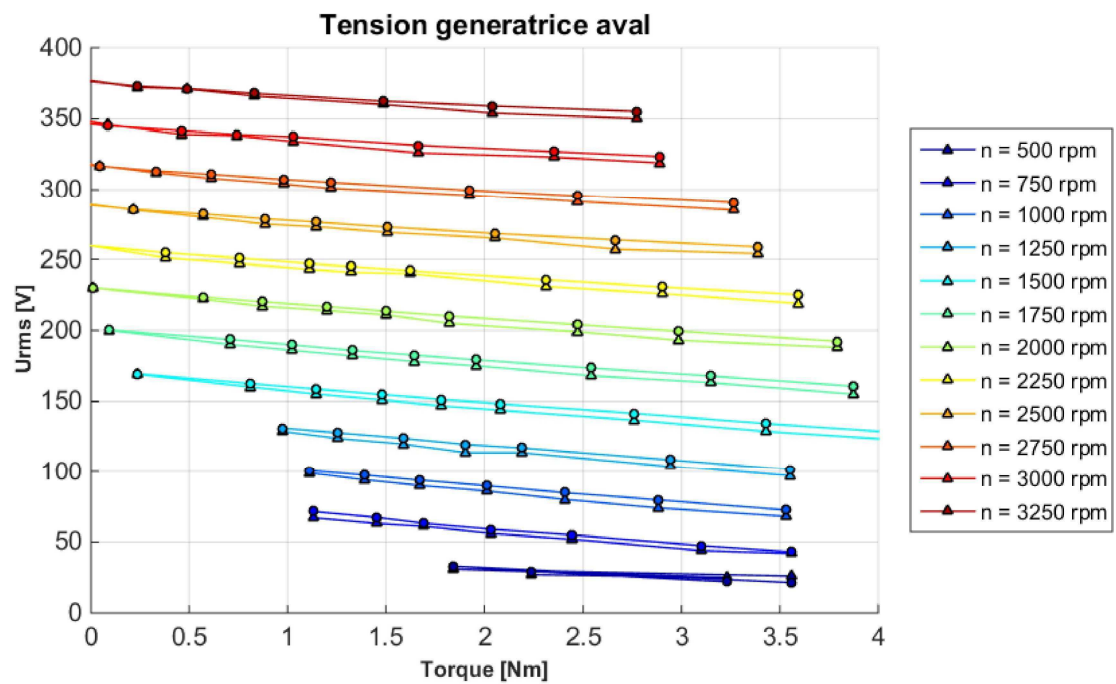
22) Rendement génératrice amont en points



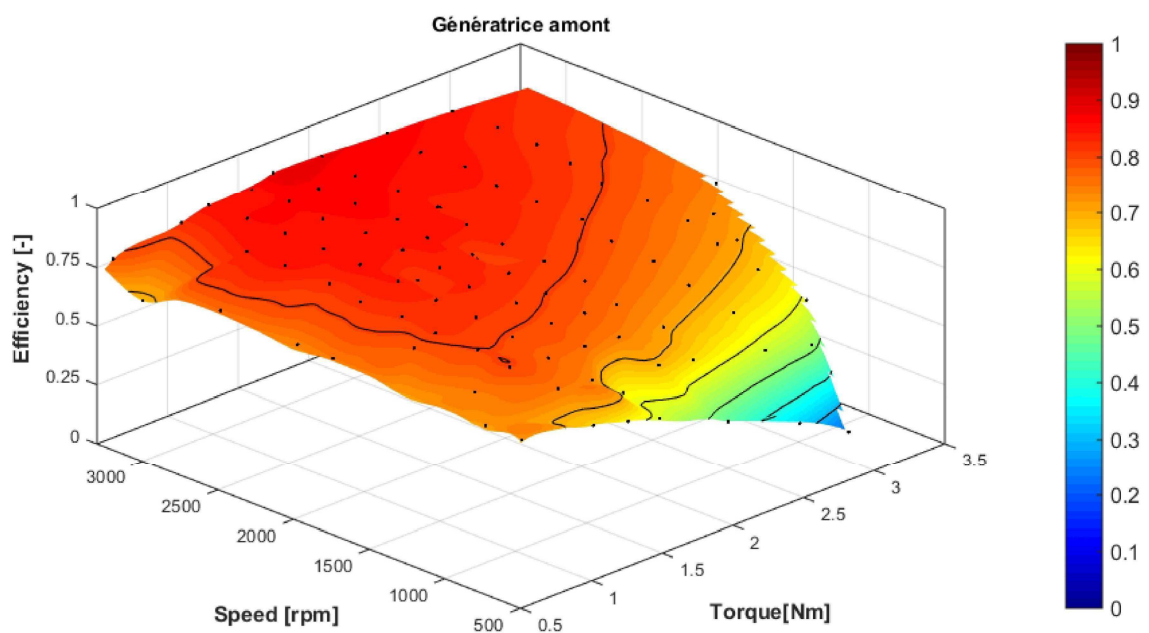
23) Rendement génératrice aval en points



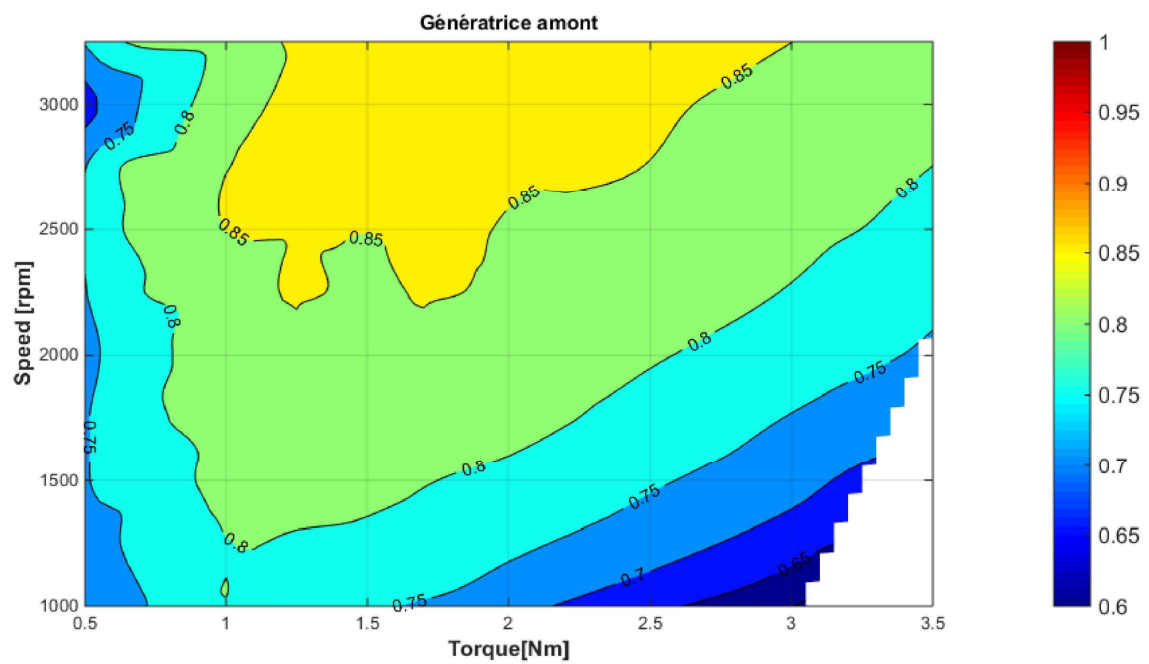
24) Tension génératrice amont (comparaison entre le retour du convertisseur et la mesure)



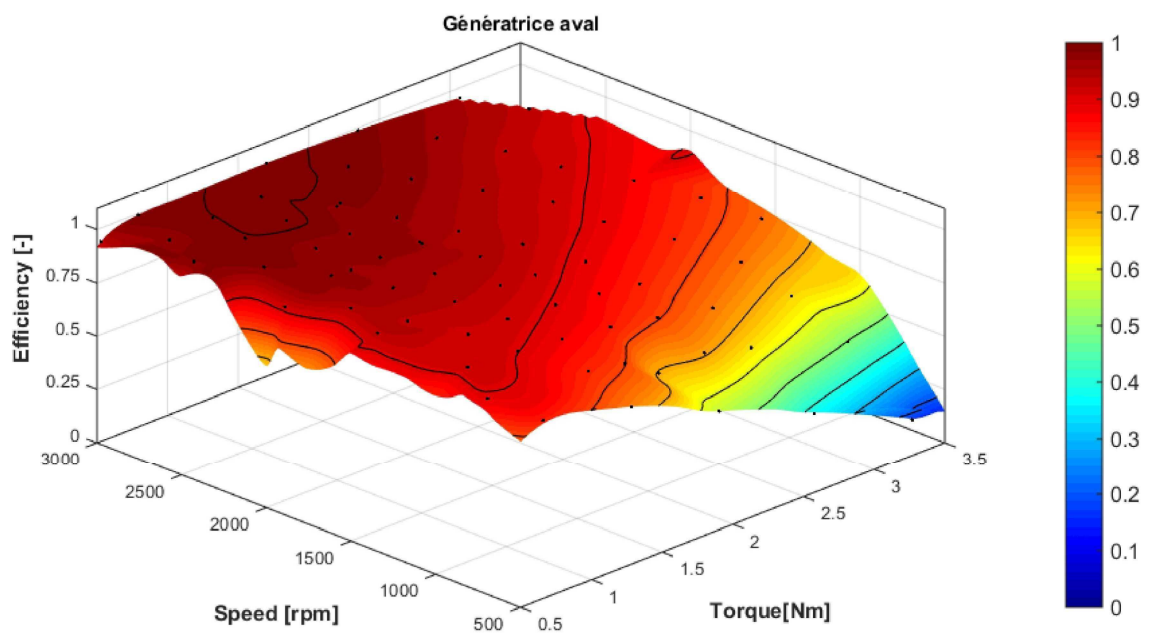
25) Tension génératrice aval (comparaison entre le retour du convertisseur et la mesure)



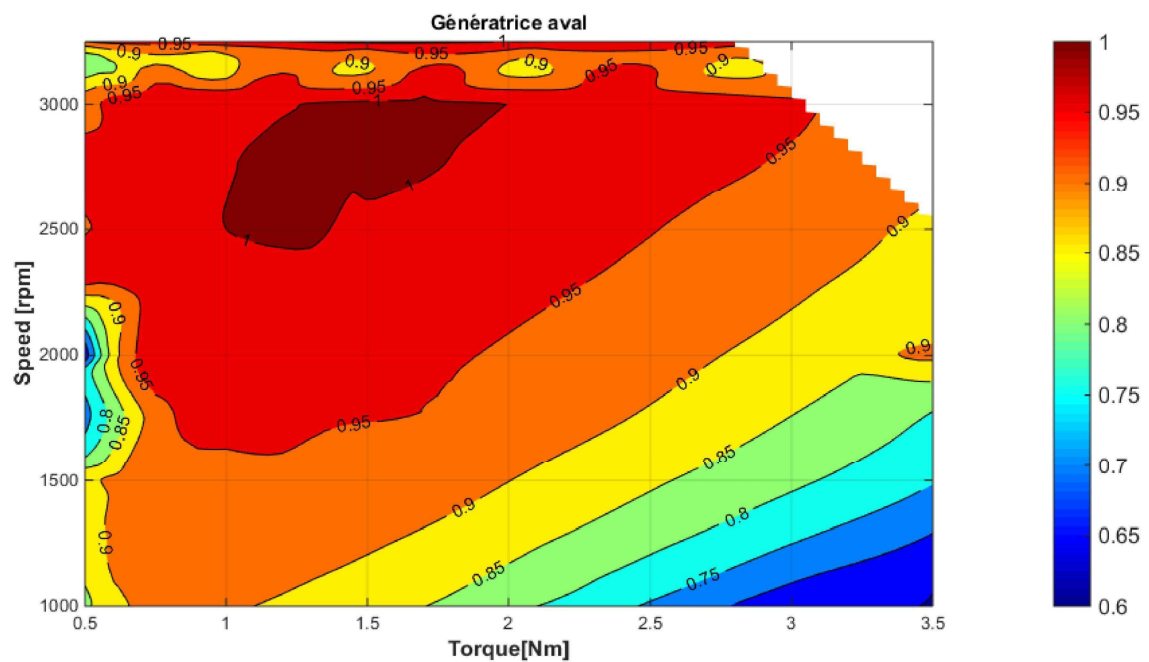
26) Rendement de la génératrice amont 3D *



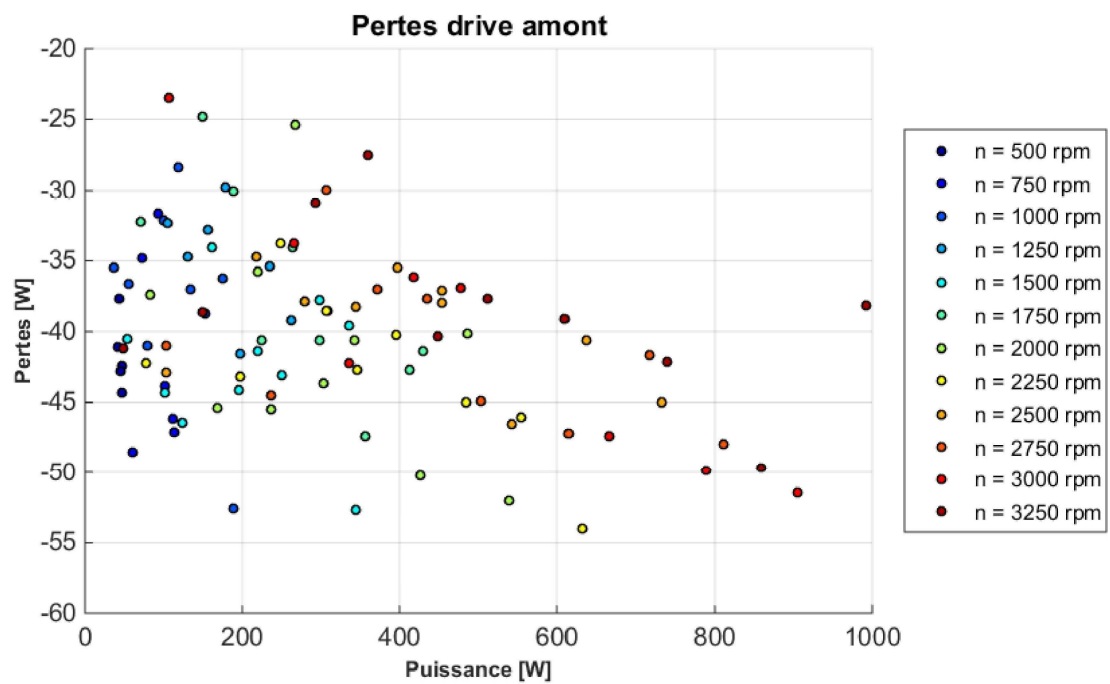
27) Rendement de la génératrice amont 2D *



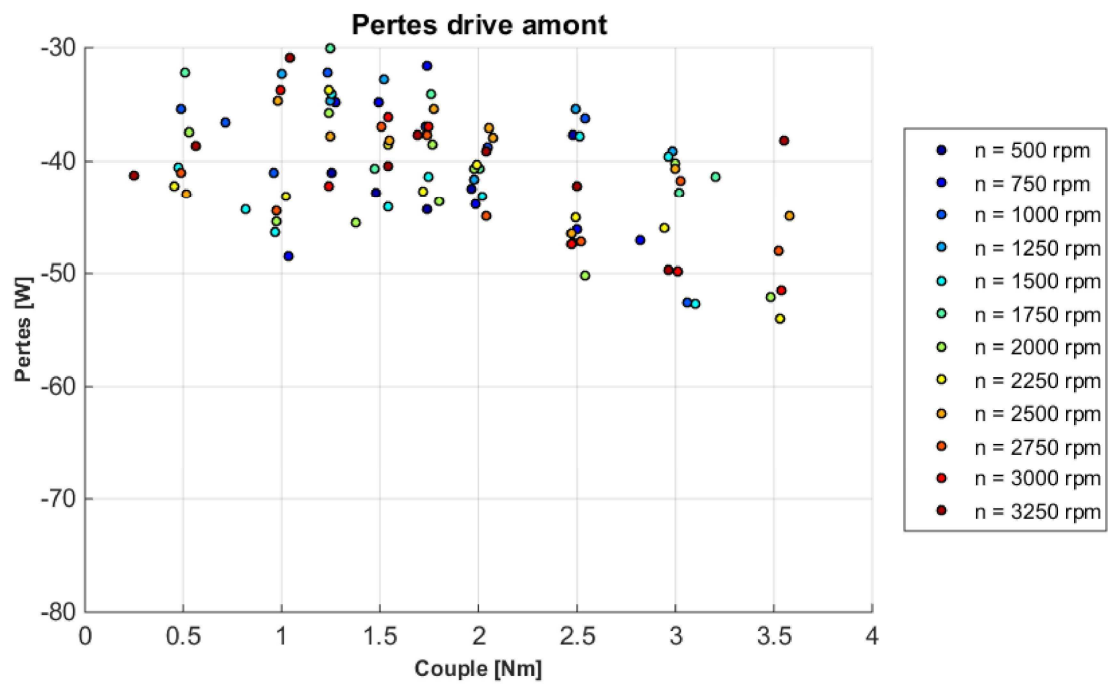
28) Rendement de la génératrice aval 3D *



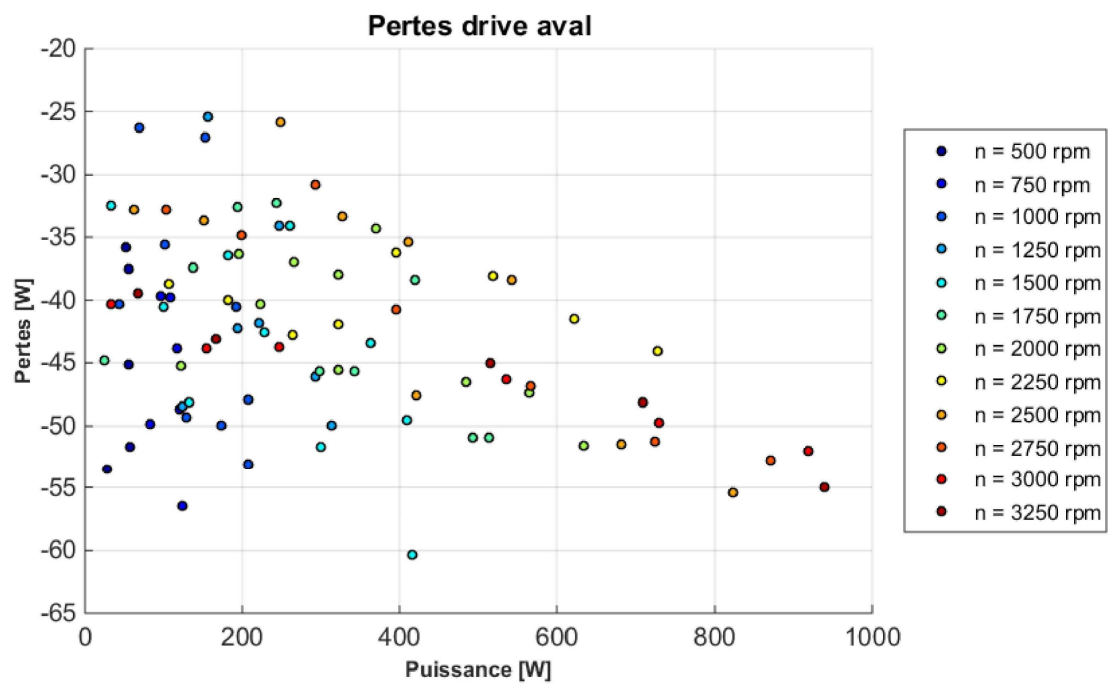
29) Rendement de la génératrice aval 2D *



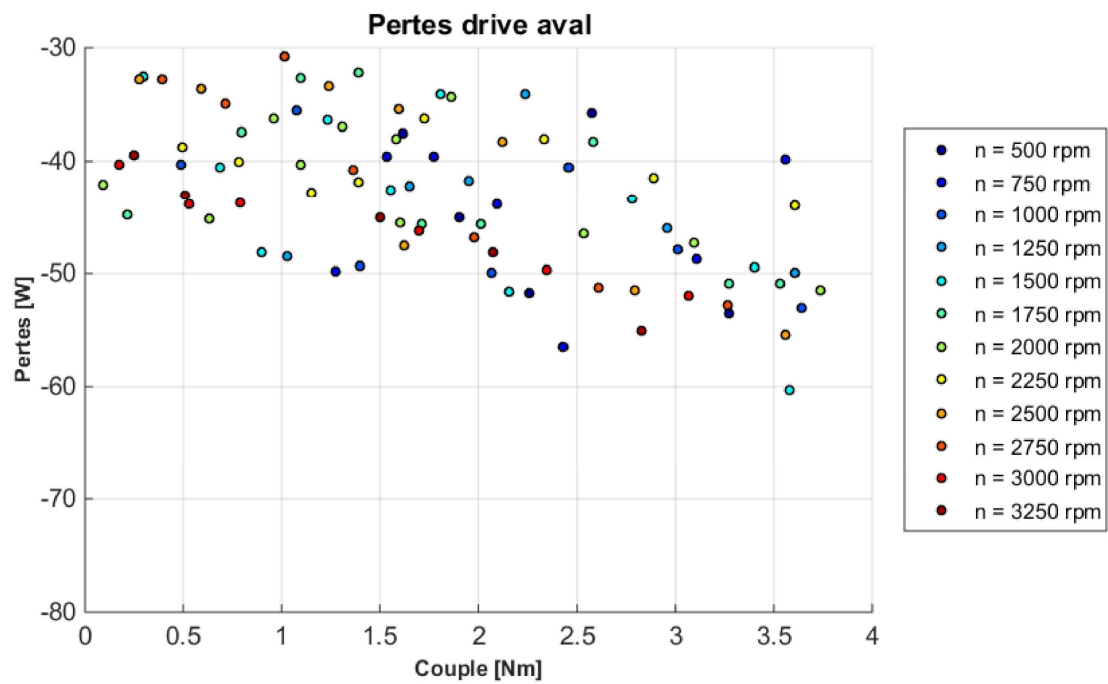
30) Pertes en fonction de la puissance drive amont *



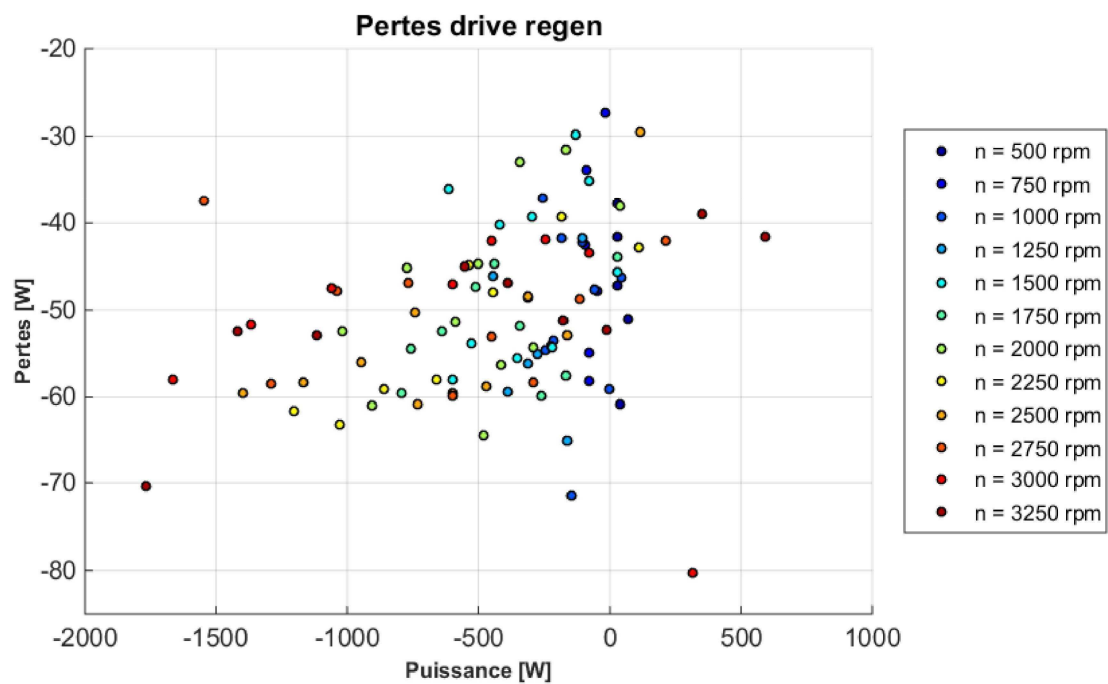
31) Pertes en fonction du couple drive amont *



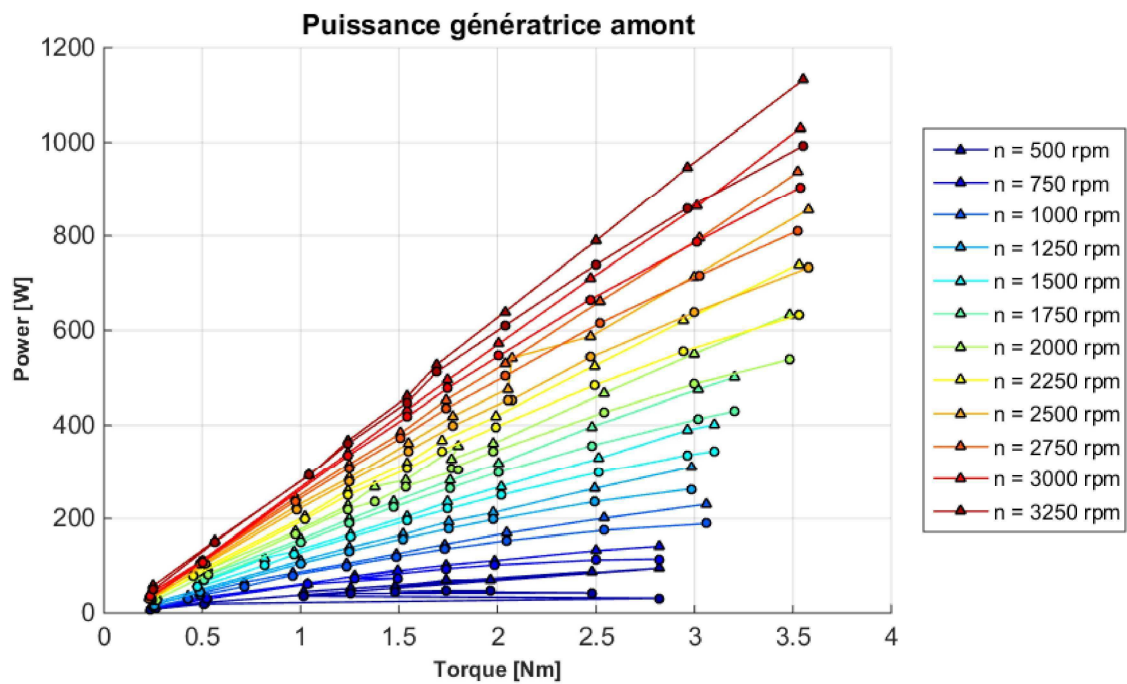
32) Pertes en fonction de la puissance drive aval *



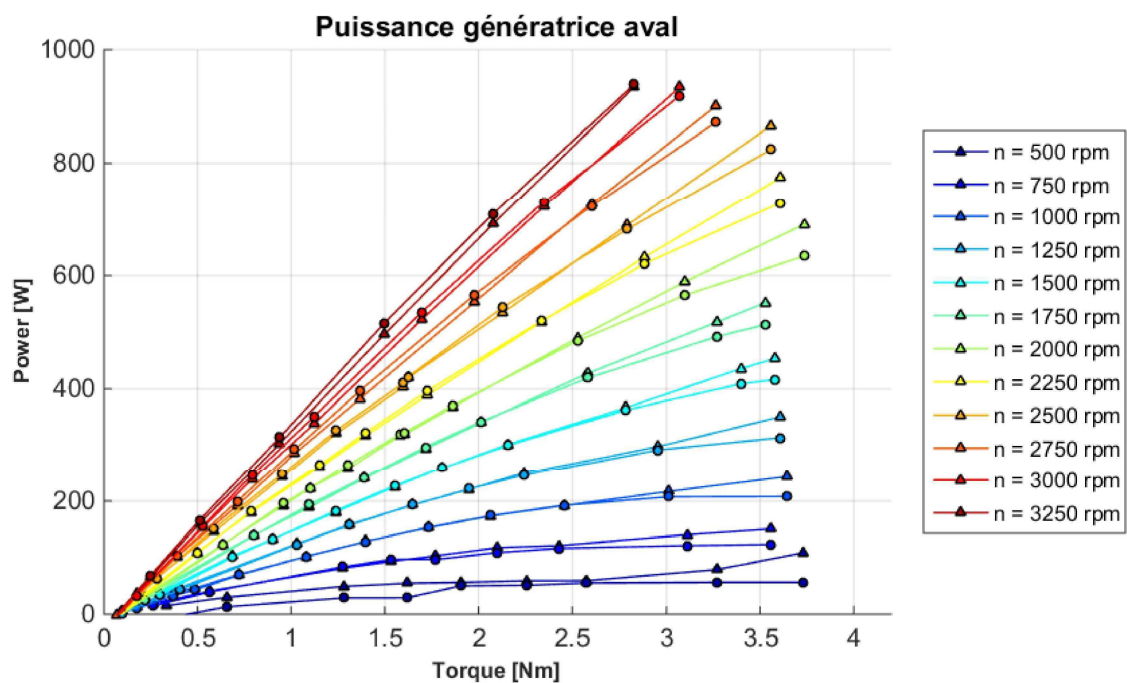
33) Pertes en fonction du couple drive aval *



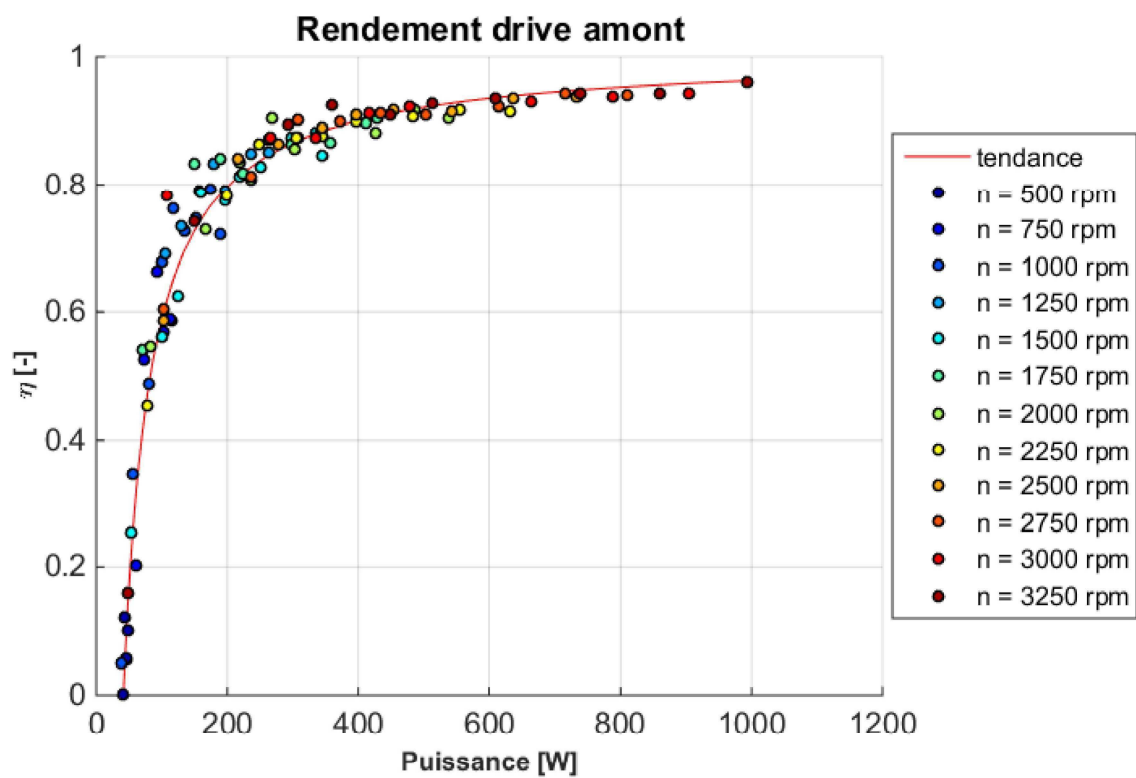
34) Pertes en fonction de la puissance drive regen *



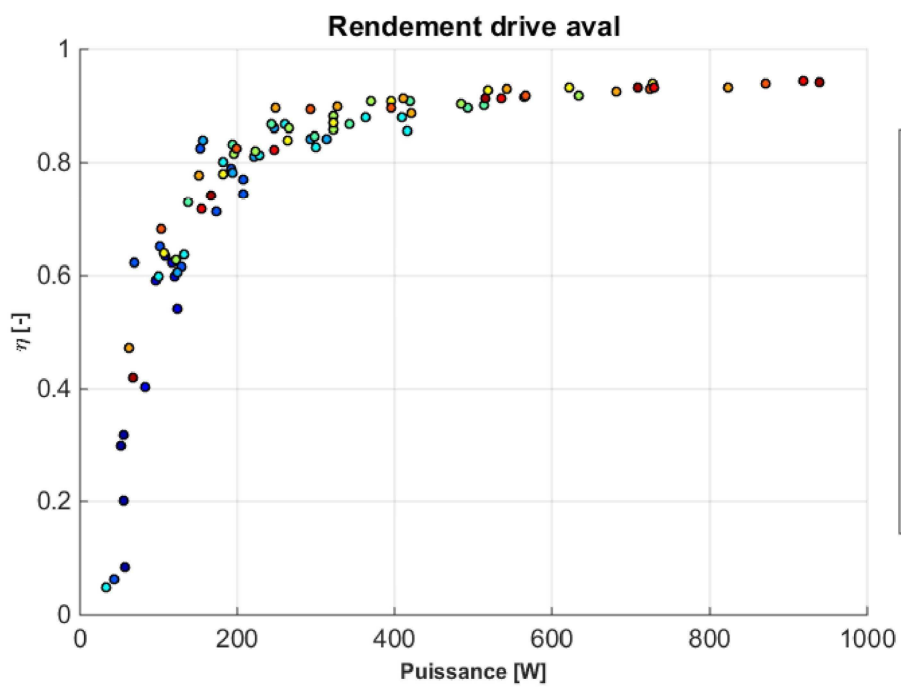
35) Puissance génératrice amont (comparaison entre le retour du convertisseur et la mesure) *



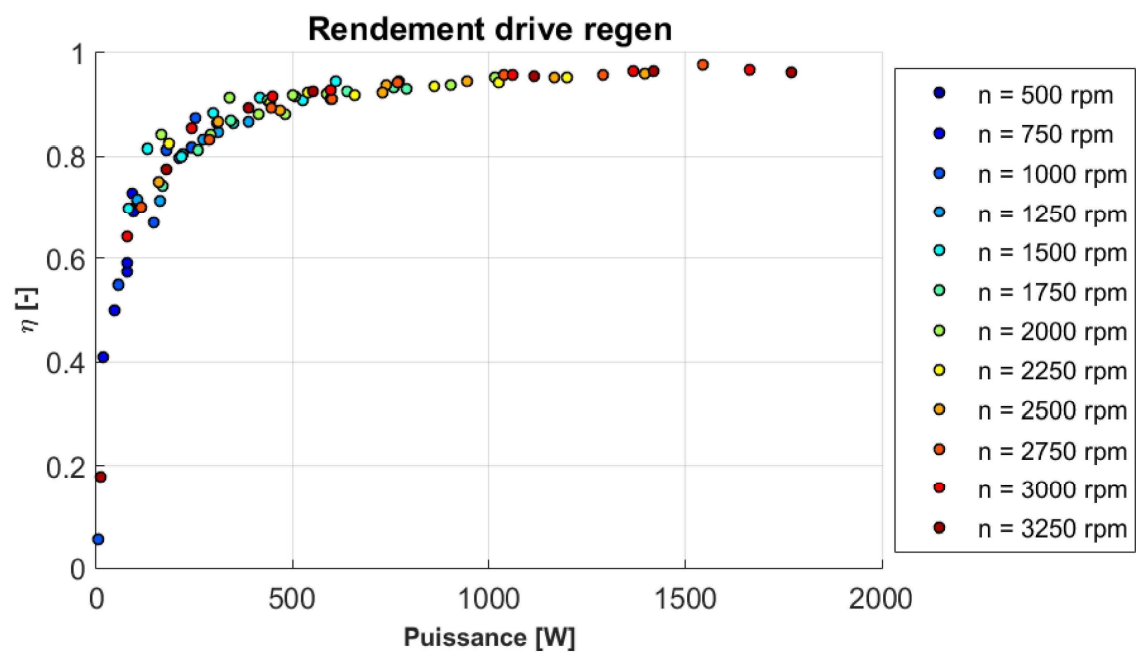
36) Puissance génératrice aval (comparaison entre le retour du convertisseur et la mesure) *



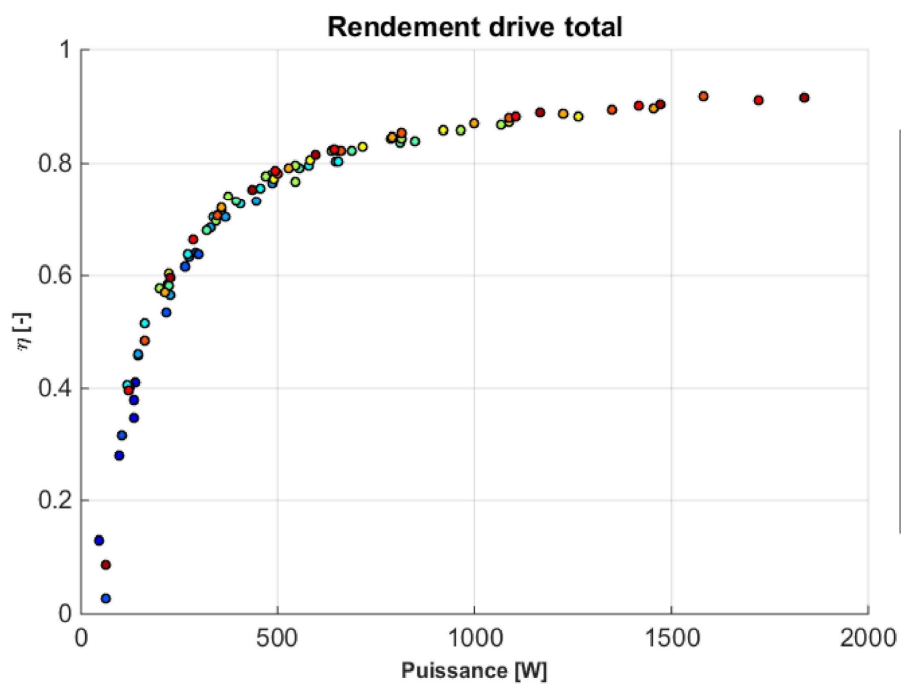
37) Rendement drive amont 2D *



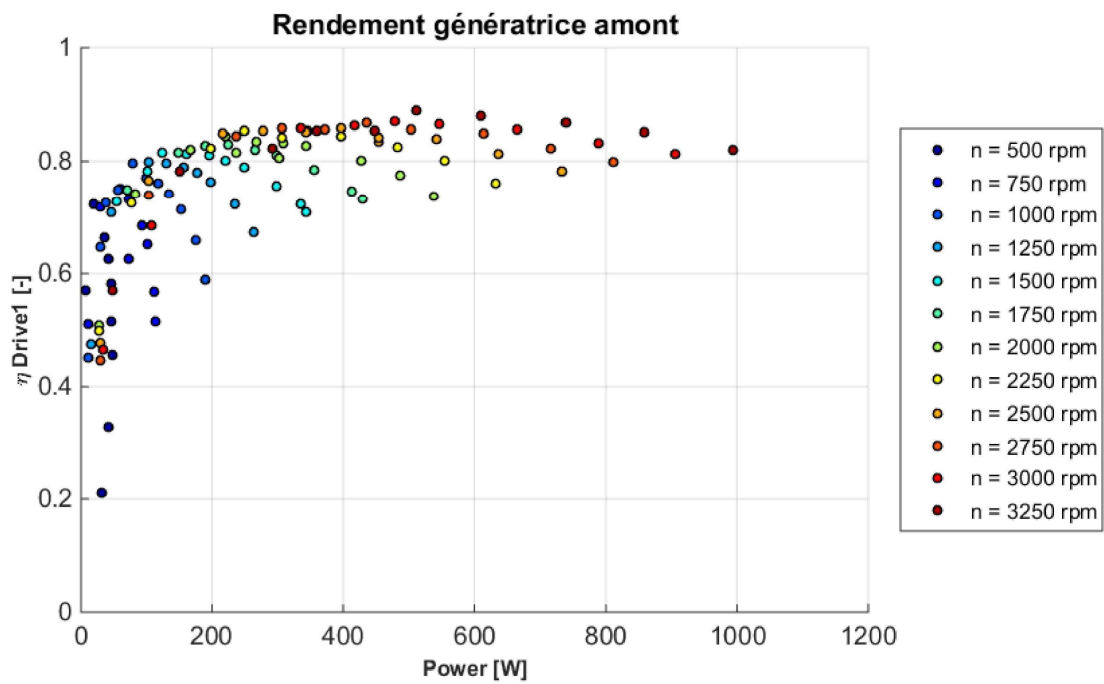
38) Rendement drive aval 2D *



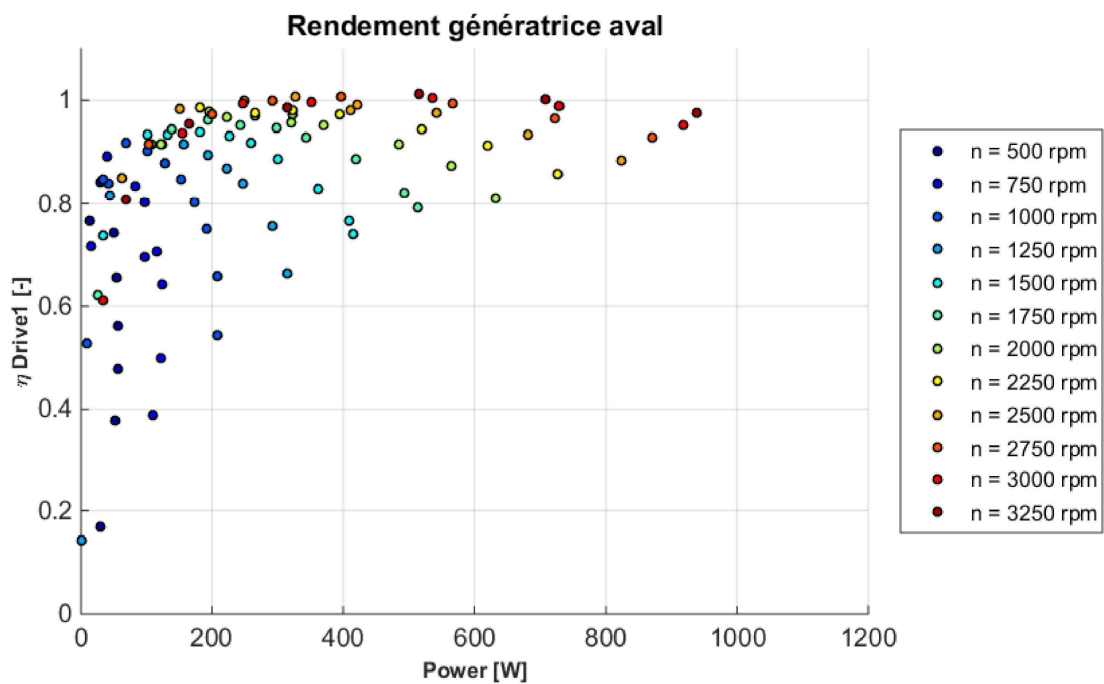
39) Rendement drive regen 2D *



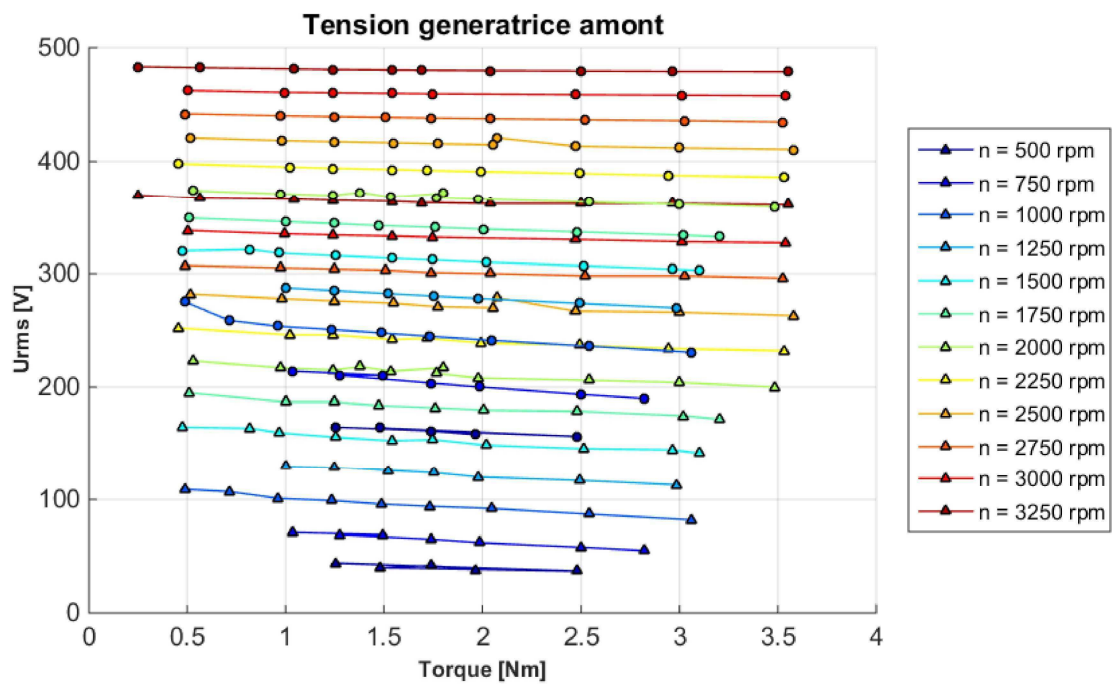
40) Rendement total des convertisseurs 2D *



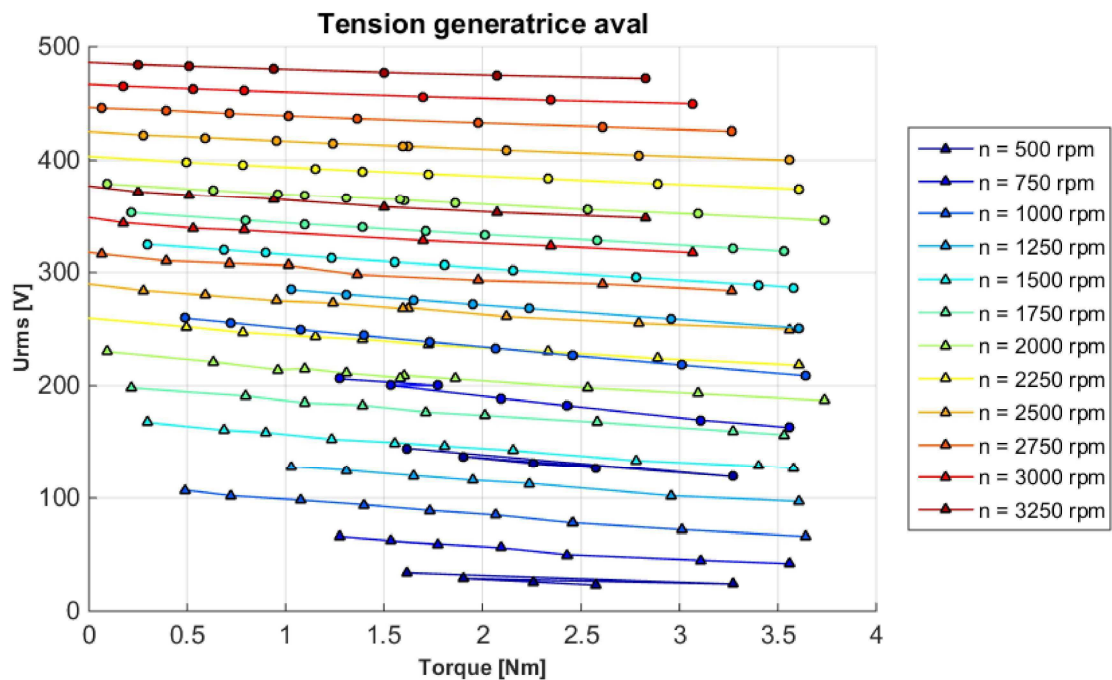
41) Rendement génératrice amont en points *



42) Rendement génératrice aval en points *



43) Tension génératrice amont (comparaison entre le retour du convertisseur et la mesure)



44) Tension génératrice aval (comparaison entre le retour du convertisseur et la mesure) *

Annexe 4

BEP des roues

- Extrait du rapport :
H. Vlad, B. Francisco, G. Shadya et M. Cécile,
«Design and Control of a New Hydraulic
Test Rig for Small Power Turbomachines,»
Sion, 2014.

Operating Characteristics

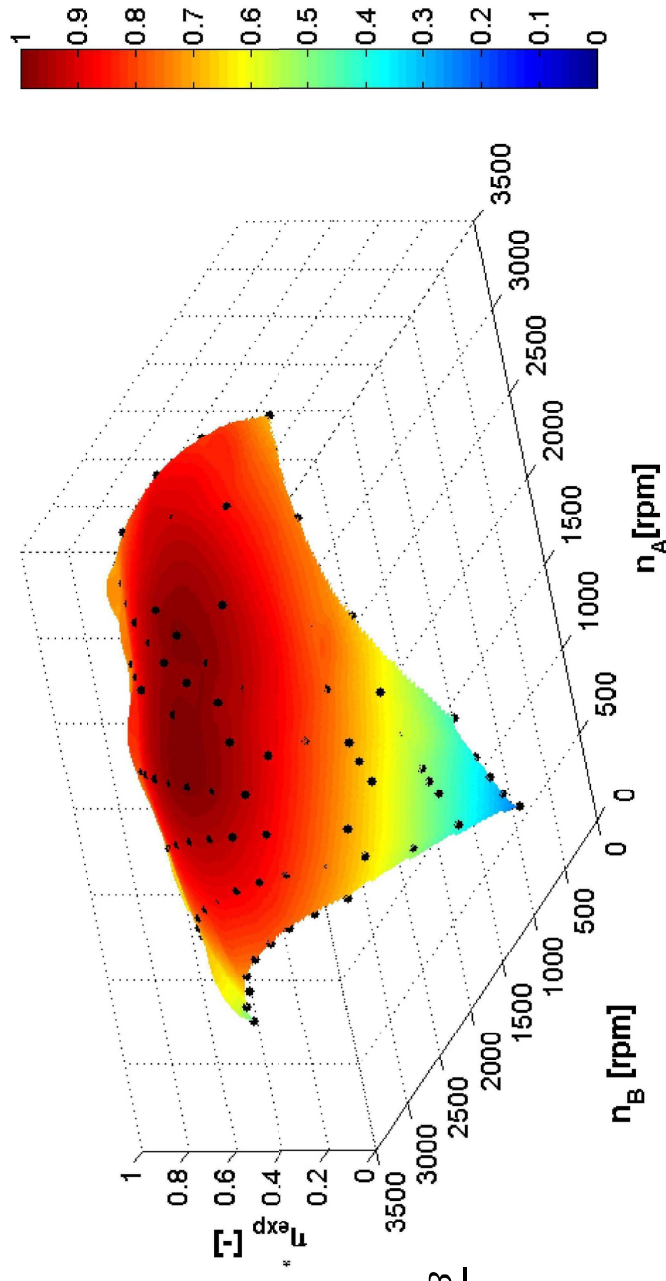
□ Constant test head: $E = 130 \text{ [J/kg]}$

□ Regulation: $\omega = \frac{2\pi n}{30} \text{ [rad/s]}$

$$\alpha = \frac{\omega_A}{\omega_B} [-]$$

□ Efficiency: $\eta_{exp} = \frac{\omega_A T_A + \omega_B T_B}{\rho Q E}$

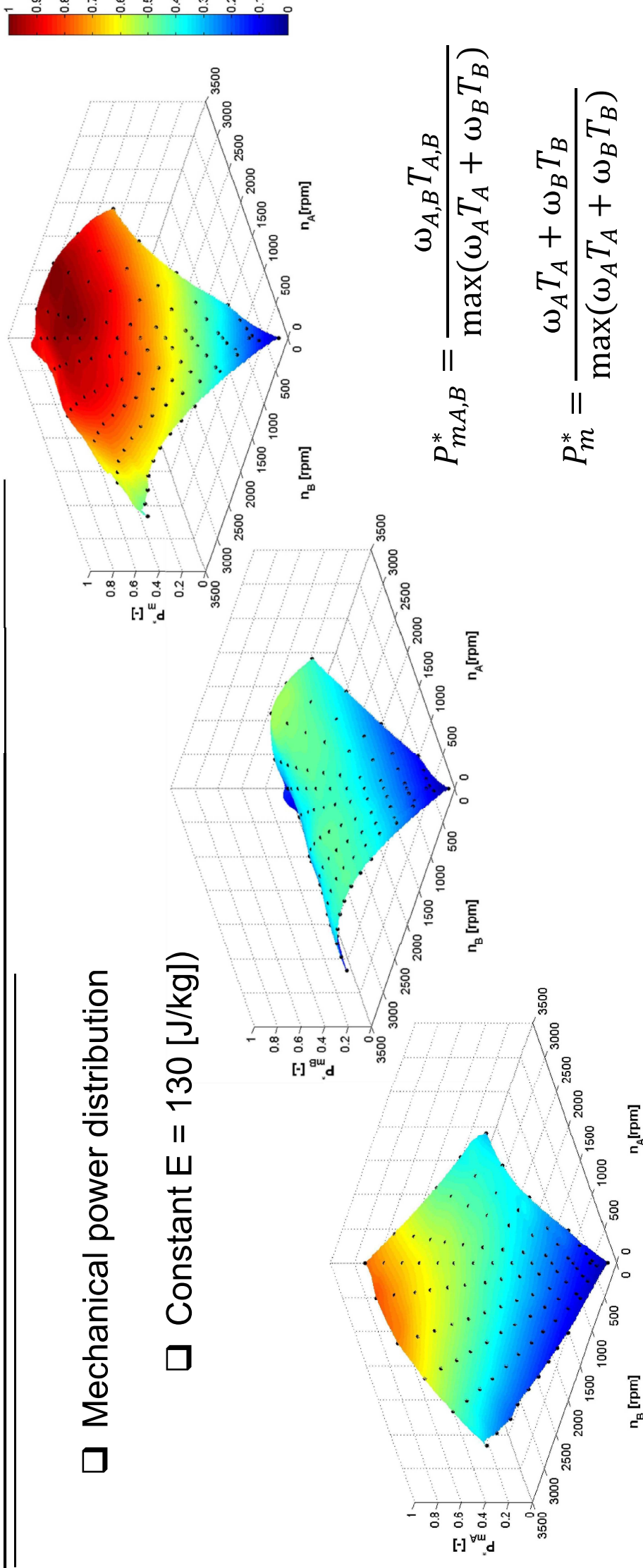
$$\eta_{exp}^* = \frac{\eta_{exp}}{\eta_{exp_max}}$$



Operating Characteristics

□ Mechanical power distribution

□ Constant E = 130 [J/kg]



Operating Characteristics

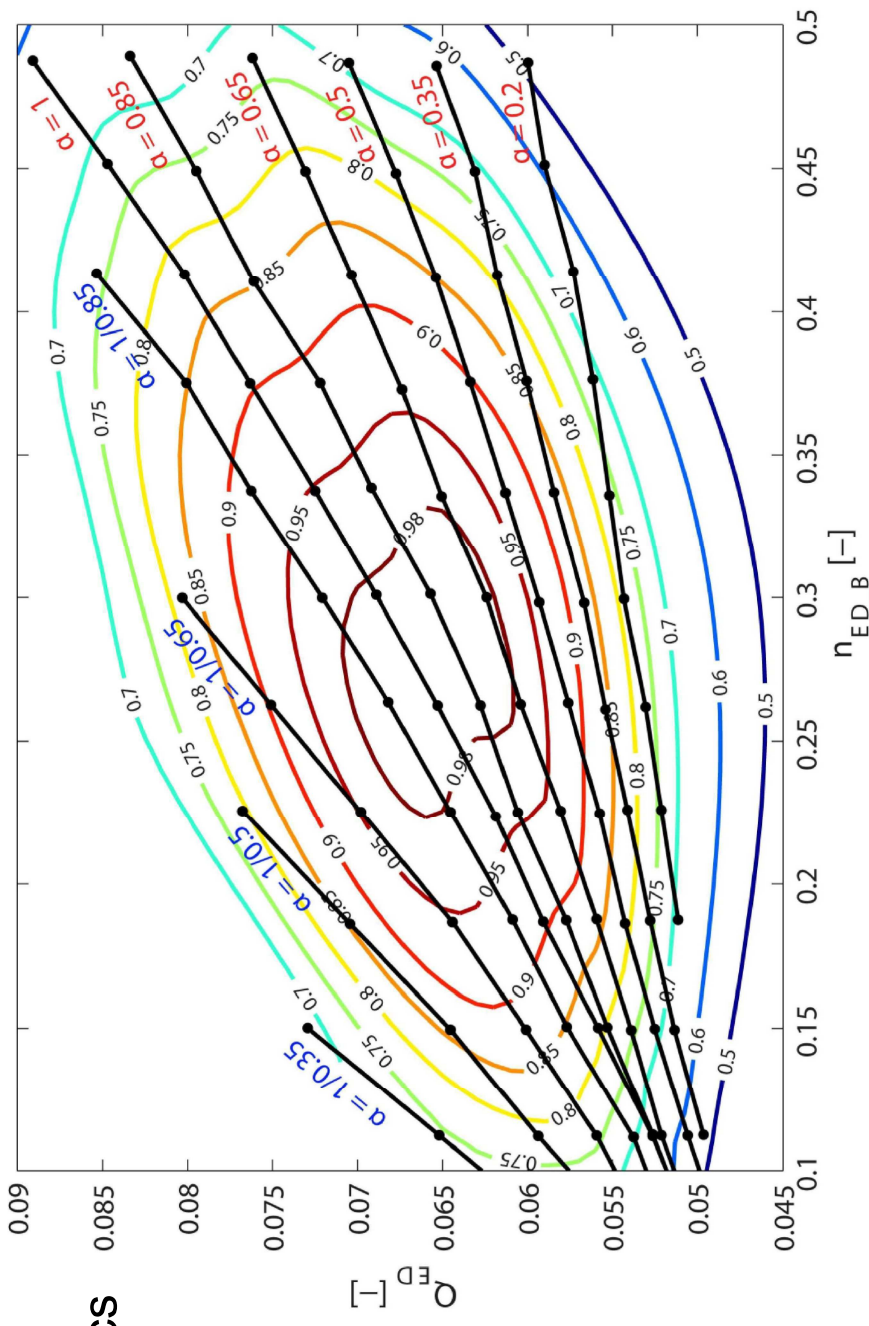
□ Discharge - speed characteristics

□ Constant $E = 130 \text{ [J/kg]}$

□ Reference: runner B

$$n_{ED_B} = \frac{n_B D_e}{60 \sqrt{E}} [-]$$

$$Q_{ED} = \frac{Q}{D_e^2 \sqrt{E}} [-]$$



Annexe 5

Datasheet NCTE Couplementre

Torque Sensor Series 2000



- Magnetostrictive Torque Sensor
- Bi-directional measurement range from 0 to 500Nm
- Accuracy class¹⁾ 1
- High tolerable dynamic loads
- High tolerable transverse forces and bending moments
- Maintenance-free operation
- Torque measurements up to 5000rpm
- Integrated signal conditioning
- Analog output signal

1. Short description

With this torque sensor the effective torque on the gauge bar can be measured bi-directionally in real time both at rest and in rotation. The sensor is delivered as a complete unit with corresponding connecting cable and key stones. The transmitting shaft, the contact-free signal pick-up and the analog signal processing are integrated into the sensor structure. The torque sensor is particularly characterized by its low price and high robustness. Therefore the sensor is specially applicable under harsh ambient conditions.

2. Model Series 2000

Model Series 2000			Nominal-Torque	Max. load	Rotational Speed [rpm]
Round shaft (Rd)	Square shaft (Sq)	Unit	bidirectional (+/-)	bidirectional (+/-)	Rd/Sq
Ø 9 mm	¼ Inch	[Nm]	2,5	5,0	5000/1000
		[ft-lb]	1,8	3,7	
		[Nm]	5,0	10,0	5000/1000
		[ft-lb]	3,7	7,4	
		[Nm]	7,5	15,0	5000/1000
		[ft-lb]	5,5	11,1	
Ø 14 mm	⅜ Inch	[Nm]	75,0	150,0	5000/1000
		[ft-lb]	55,3	110,6	
Ø 19 mm	½ Inch	[Nm]	175,0	350,0	5000/1000
		[ft-lb]	129,0	258,0	
		[Nm]	250,0	350,0	5000/1000
		[ft-lb]	184,3	258,0	
Ø 25 mm	¾ Inch	[Nm]	500,0	750,0	5000/1000
		[ft-lb]	368,6	552,9	

Torque Sensor Series 2000



3. Technical Characteristics of the Sensor

No.	Model	Series 2000								
	Accuracy class ¹	1								
		Unit	Value							
1	Linearity deviation incl. hysteresis	%ME*	<± 1,0							
2	Rotational Signal Uniformity (RSU)	%ME*	<± 1,0							
3	Repeatability	%ME*	<± 0,05							
	Output signal in general	Unit	Value							
4	Frequency range, -3dB point, Bessel characteristics	Hz	1000							
5	Analog signal	V	0... 5							
6	Signal at torque = Zero	V	≈ 2,5							
7	Signal at positive nominal torque	V	> 2,5							
8	Signal at negative nominal torque	V	< 2,5							
9	Calibration parameter	mV/Nm	---							
10	Output resistance	Ω	50							
	Effect of Temperature	Unit	Value							
11	Zero point drift over temperature	%/10K	<1,0							
12	Signal drift over temperature within nominal temperature range ²	%/10K	<1,0							
	Power supply	Unit	Value							
13	Supply voltage	VDC	9...12							
14	Current consumption (max.)	mA	10							
15	Start-up peak	mA	<40							
16	Absolute max. supply voltage	VDC	13							
	General information	Unit	Value							
17	Degree of protection acc. to EN 60529	IP	50							
18	Reference temperature	°C	+15...+35							
19	Operational temperature range	°C	-30...+85							
20	Storage temperature range	°C	-30...+100							
	Nominal rated torque M (bi-directional)	Nm	2,5	5,0	7,5	17,5	75	175	250	500
21	Weight	Rd	g	386	392	400	685	856		1230
		Sq		395	401	414	652	754		878
22	Moment of inertia	Rd	g mm ²	597	662	1073	4922	19126		79754
		Sq		582	648	904	3339	13294		57770

%ME: related to a full scale measurement range

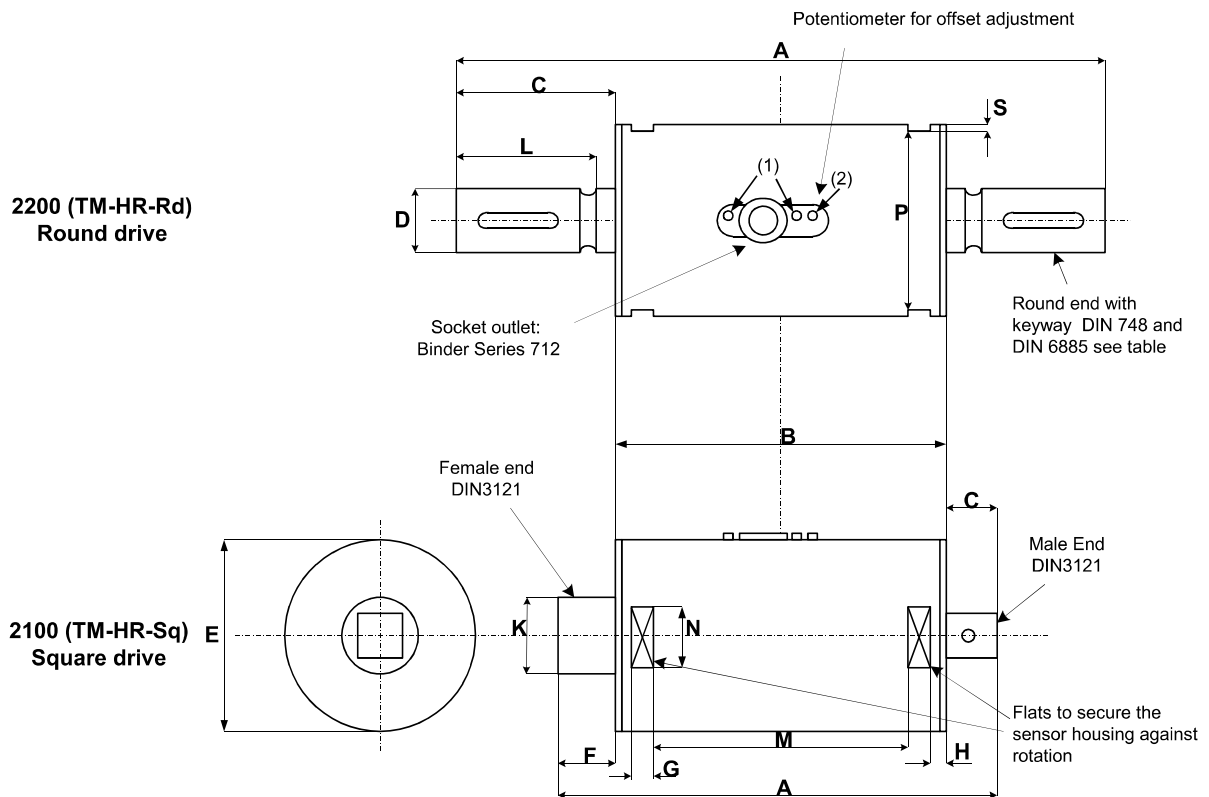
- 1) The accuracy class implies that taken separately both the linearity deviation as well as the rotational signal uniformity are either lower than or equal to the value of the accuracy class. The accuracy class is not to be identified with the classification following DIN 51309 or EA-10/14.
- 2) The factor of transmission declines linearly up to a maximum of 0,5% / 10K with rising temperature, due to the reduction of the elasticity.

4. Versions and Order Options

Series 2000 Accuracy 1%				
		Option 1: Measurement range		
		2,5	Nm	
		5	Nm	
		7,5	Nm	
		17,5	Nm	
		75	Nm	
		175	Nm	
		250	Nm	
		500	Nm	
		Option2: Shaft ends		
		0	Standard round ends with key stones	
		1	Square shaft ends	

Torque Sensor Series 2000

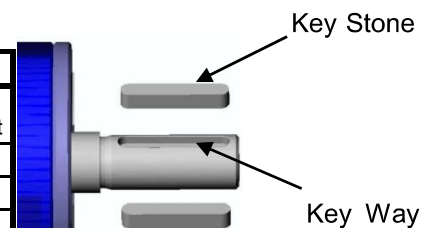
5. Dimensions



- (1) Do not loosen or tighten the mounting nuts of the socket and the lock screws
(2) Offset adjustment

Dimensions	Nominal Torque Capacity [Nm]	A	B	C	D	E	F	G	H	K	L	M	N	P	S
Square drive shaft (2100)															
1/4 Inch	2.5 - 5.0 - 7.5 - 17.5	95,5	70	9,5	-	40	16	8	5	12	-	43,9	15	37	1,5
3/8 Inch	75	107	70	13	-	50	24	8	5	18	-	43,9	18	47	1,5
1/2 Inch	175 - 250	123,5	70	18,5	-	50	35	8	5	24	-	43,9	18	47	1,5
3/4 Inch	500	146	87	29,6	-	60	29,6	10,5	2	33,5	-	61,4	19	57	1,5
Round drive shaft (2200)															
Ø 9 mm	2.5 - 5.0 - 7.5 - 17.5	125	70	27,5	9	40	-	8	5	-	23	43,9	15	37	1,5
Ø 14 mm	75	139	70	34,5	14	50	-	8	5	-	30	43,9	18	47	1,5
Ø 19 mm	175 - 250	179	70	54,5	19	50	-	8	5	-	50	43,9	18	47	1,5
Ø 25 mm	500	220	87	66,6	25	60	-	10,5	2	-	-	61,4	19	57	1,5

Dimensions Keyway [mm]				Keystones		
Round drive shaft	Width	Depth	Length	Height	Length	Amount
Ø 9 mm	3	1,8	18,5	3	18	1
Ø 14 mm	5	3	25,5	5	25	1
Ø 19 mm	6	3,5	45,5	6	45	1
Ø 25 mm	8	4	50,5	8	50	2

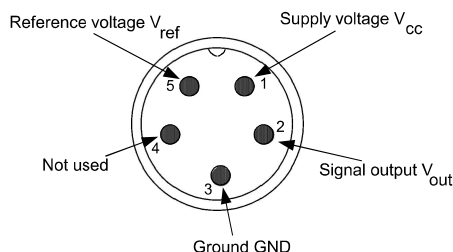


Torque Sensor Series 2000

6. Connection Plan

Sensor pin assignment

Presentation: top view



Pin	Colour	Description
1	White	Supply Voltage Vcc
2	Brown	Signal Output Vout
3	Black	Ground
4	Blue	(Not used)
5	Grey	Reference Voltage 2.5V

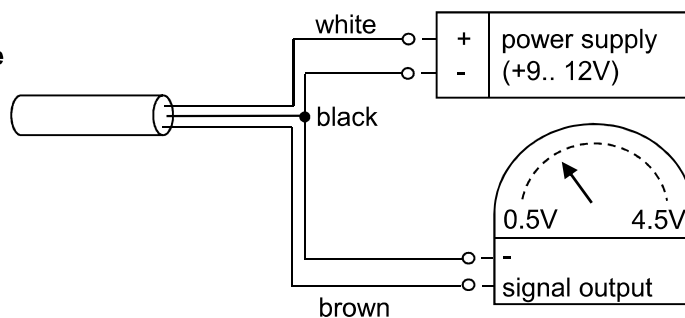
The output V_{ref} is a constant 2.5V and represents the virtual zero point for direct +/- torque measurement (See below "Sensor cable connection" section B).

At the user side one plug with shielding termination(360°) should be used. If not possible the shielding should accompany the signal as far as it could!

Sensor cable connection

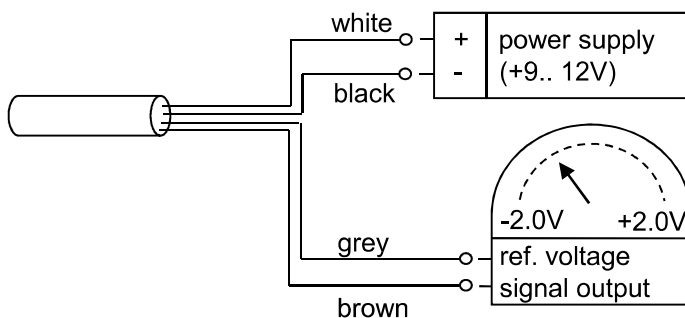
- A) This circuit is recommended for **absolute** torque measurement
e.g. 2.5V equals to approx. 0 Nm.

Grey and blue wires are not in use.



- B) This circuit is recommended for **relative** torque measurement
e. g. 0 V equals to approx. 0 Nm.

Blue wire is not in use.



7. Operating Instructions

7.1 Field of Application

The torque sensor is intended for use in an industrial environment (e. g. test bench).

7.2 Scope of Delivery

The torque sensor set consists of the sensor itself (signal pick-up and signal processing integrated into sensor housing), one connecting cable with a soldered plug, key stones and the instruction manual.

7.3 Installation and Removal

Make sure to install the sensor shafts exactly with the proper aligned connecting shafts. The key stone adapter / square endings of the connecting shafts are to be attached forceless to the corresponding ones of the sensor. No external axial force should be on the housing of the sensor by fixing it. The spanner flat is for the protection of the sensor from distortion. A maximum cable length of 3m must not be exceeded. Using a cable or connector other than supplied by **NCTEngineering**, or a similar cable that is of a different length may affect the overall performance of the sensor.

DO NOT REMOVE THE SHAFT WITH TORQUE APPLIED TO THE SENSOR.

7.4 Interface Description

Mechanical connection:

The key stone adapters on both ends of the measurement shaft are intended for torque transmission.

Electrical connector:

On the sensor housing there is a 5-pin socket for the power supply and the signal output (see Chapter 6 Connection Plan).

7.5 Operation (in regular case or in optimal case)

Optimal measurement parameters can be achieved when the sensor is applied in accordance to the specification. Use the sensor only for short periods of time at the maximum rotational speed. By compliance with the specification the sensor works generally trouble-free and maintenance-free.

7.6 Irregular Operation, Measures against Disturbance

The presence of external electromagnetic or magnetic fields can lead to irregular measurement results. The mechanical overload on the sensor (e.g. exceeding of maximum allowed torque or severe vibrations) may cause damage to the sensor and in consequence the incorrect signal output. In such cases please do not open the sensor. Contact **NCTEngineering GmbH** directly for assistance.

7.7 Commissioning

After sensor installation pay attention to the followings:

- Switch on the power supply unit and check the supply voltage. Peak voltage must be avoided! Be sure to verify the power supply voltage before connecting the sensor!
- Connect the sensor to the power supply unit by using the delivered cable.
- Connect the sensor output to a high-resistance device such as an A/D converter, oscilloscope, PC measurement board. The sensor should be in mechanical unloaded state while connecting it.

7.8 Service and Maintenance

Service Hotline:

Phone: +49 89 66 56 19 0

Fax: +49 89 66 56 19 29

7.9 Disposal

Please return the device to **NCTEngineering GmbH** for disposal.

Torque Sensor Series 2000

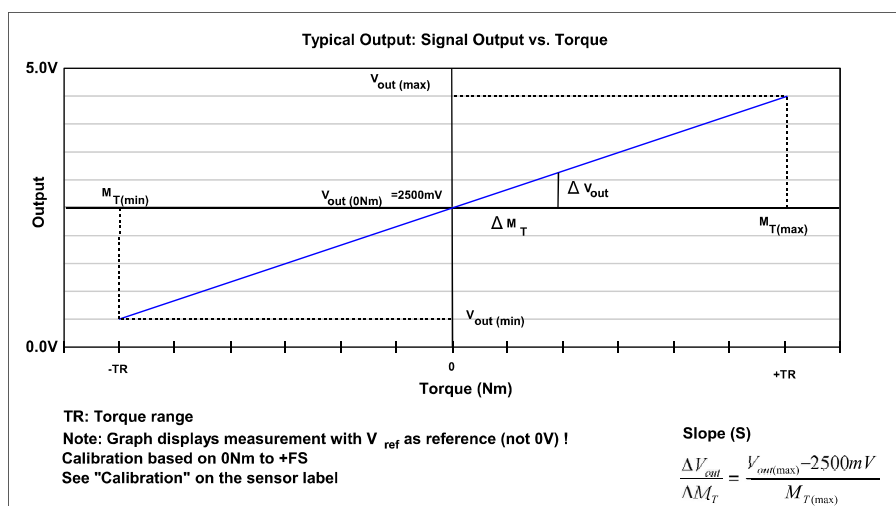
7.10 Handling and Transportation

By handling, storage and transportation keep the sensor away from magnetic or electromagnetic fields which may exceed the maximal intensity defined from EMC (see Chapter 3. Technical Characteristics of the Sensor).

7.11 Precautions

- Do not open the sensor housing under any circumstances.
- Do not remove or loosen the locking rings on the shaft ends.
- Do not loosen or tighten the flange-mounting nut of the socket-connector and the fixing screws(1) (see Chapter 5. Dimensions).
- Use only a separate power supply for the sensor.
- Use the sensor only according to the specification (Chapter 3. Technical Characteristics of the Sensor)

8. Typical Sensor Output



Example of Sensor Label



$V_{out(max)}$ and $V_{out(min)}$ are defined with the slope of the sensor. i.e. the output voltage could be between 0.5V and 4.5V. The actual signal output range depends however on the calibration value.

9. Contact

NCTEngineering GmbH

Erlenhof-Park
Inselkammerstr. 10
D-82008 Unterhaching
FR Germany
Tel.: +49 89 665619-0
Fax: +49 89 665619-29
Email: info@ncte.de

Contact persons:

Sale:
Joachim Heckler
Tel.: +49 89 665619-46
Email: Joachim.Heckler@ncte.de

Songshi Li
Tel.: +49 89 665619-17
Email: Songshi.Li@ncte.de

Annexe 6

Datasheet IED Codeur incrémental



Industrial Encoders
Direct Ltd

51HA Series

Ultra-Versatile Hollow Shaft Encoder



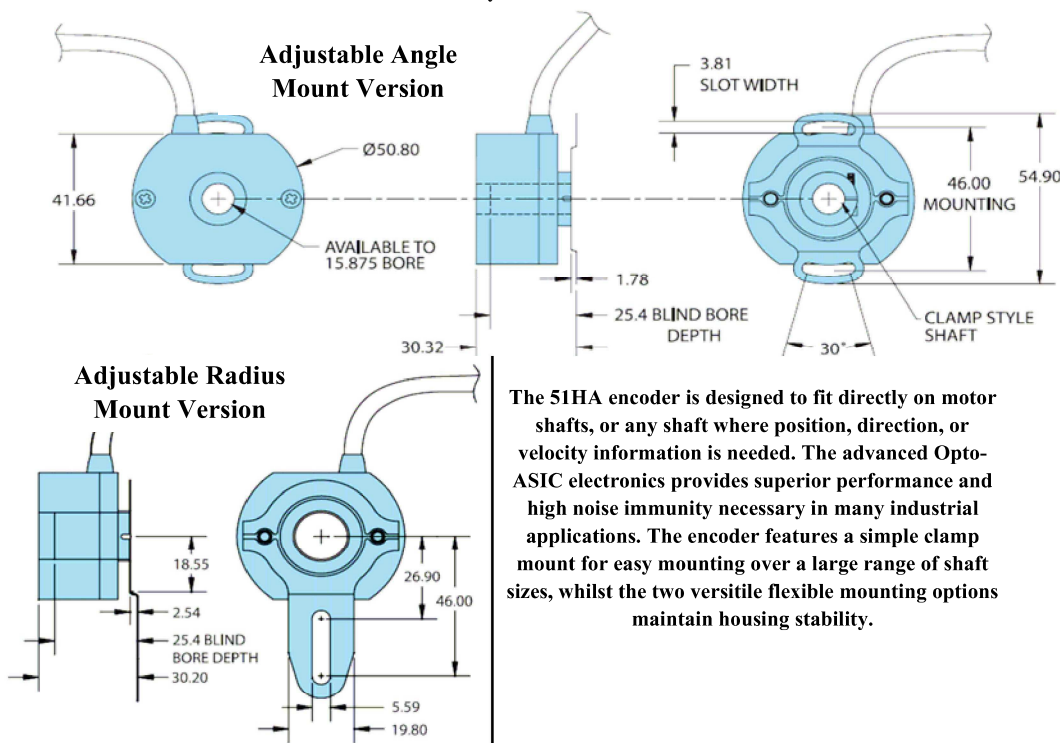
Features

- Very Slim Profile
- 100 Degrees C Operation (-40°C Available)
- Opto-ASIC Technology
- Many Resolutions Available
- Up to 15mm bore (Metric) & up to 5/8" (Imperial)

Resolutions

1
10
11
12
20
25
30
40
60
100
120
128
200
250
254
256
300
360
400
500
512
600
720
800
840
1000
1024
1200
1220
1250
1270
1800
2000
2048
2500
2540
3000
4096
5000
8192
10000

COMMON APPLICATIONS: Motor Feedback - Velocity & Position Control etc.



SPECIFICATIONS

Body:

Precision Machined
Aluminium (Anodized)

Cover:

Precision Machined
Aluminium
(Powder Coated)

Shaft:

Stainless Steel

Bearings:

Sealed Ball Race

Cable: Screened

Protection:

IP64

User Shaft Allowable Runout:

0.2mm Total Indicated Reading (TIR)
0.75mm Allowable End Play (Maximum)

Operating Temperature:

0 to +100°C
(-40°C to +70°C Optional)

Storage Temperature:

-40 to +100°C

Maximum Speed:

7500 RPM

Vibration:

10g @ 58 to 500Hz

Shock:

50g @ 11ms duration

Humidity:

98% RH (non-condensing)

Shaft Loading:

Flexible Mount (as supplied)

Cable:

Screened, oil and salt water proof

Impulse Frequency:

200KHz (Max)

Current Consumption:

100mA (Maximum - without load)

Noise Immunity:

BS EN61000-6-2; BS EN50081-2; BS
EN61000-4-2; BS EN61000-4-3; BS
EN61000-4-6; BS EN55011

TEL: (UK) +44 (0) 1978 664722

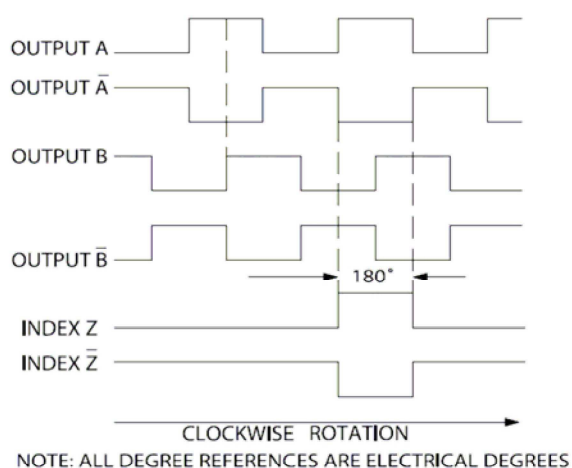
FAX: (UK) +44 1978 664733

WEB: www.industrialencodersdirect.co.uk

EMAIL: sales@industrialencodersdirect.co.uk

Ultra-Versatile Hollow Shaft Encoder

Waveform Diagram



Mounting Options

Mounting Style

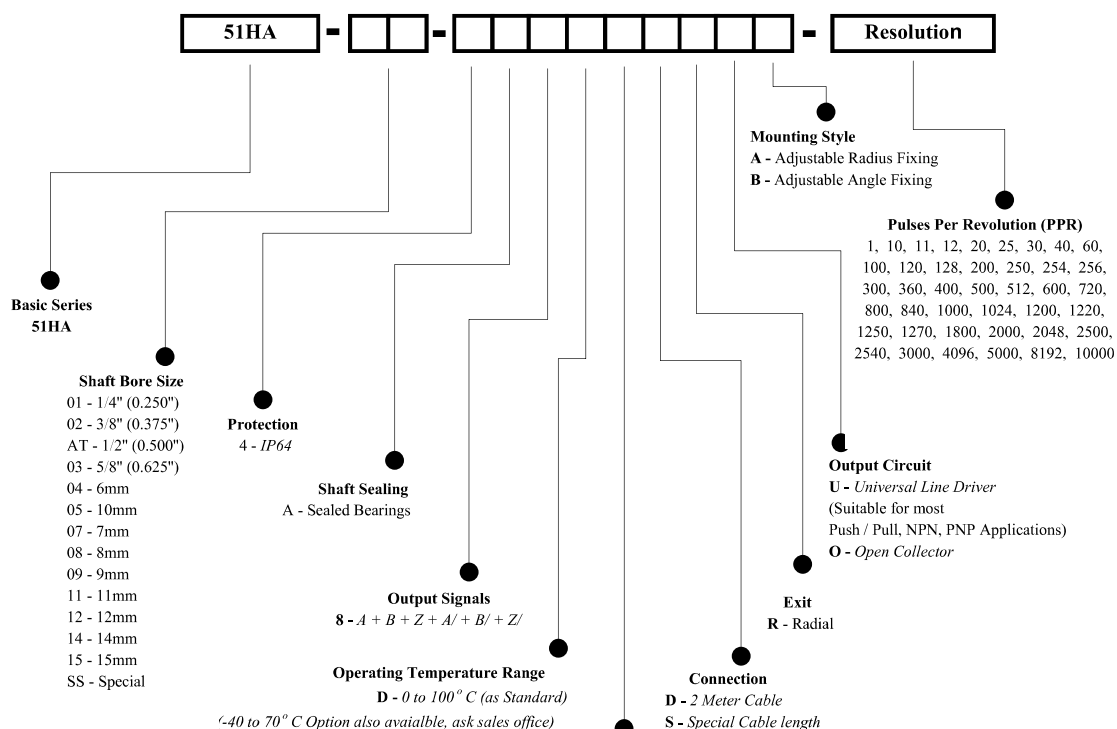
Option A - Adjustable Radius Mount



Mounting Style
Option B - Adjustable Angle Mount



Ordering Code



All information shown shall under no circumstances form part of any contractual representation by Industrial Encoders Direct Ltd.

All information is issued for guidance purposes only. A copy of our Standard Terms and Conditions is available on request.

TEL: (UK) +44 (0) 1978 664722

FAX: (UK) +44 1978 664733

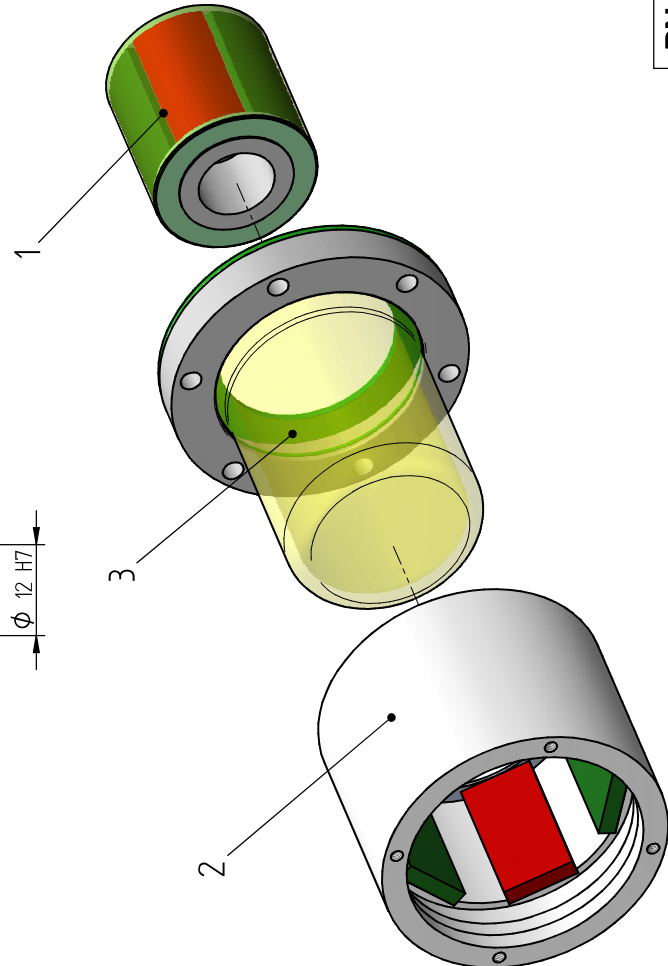
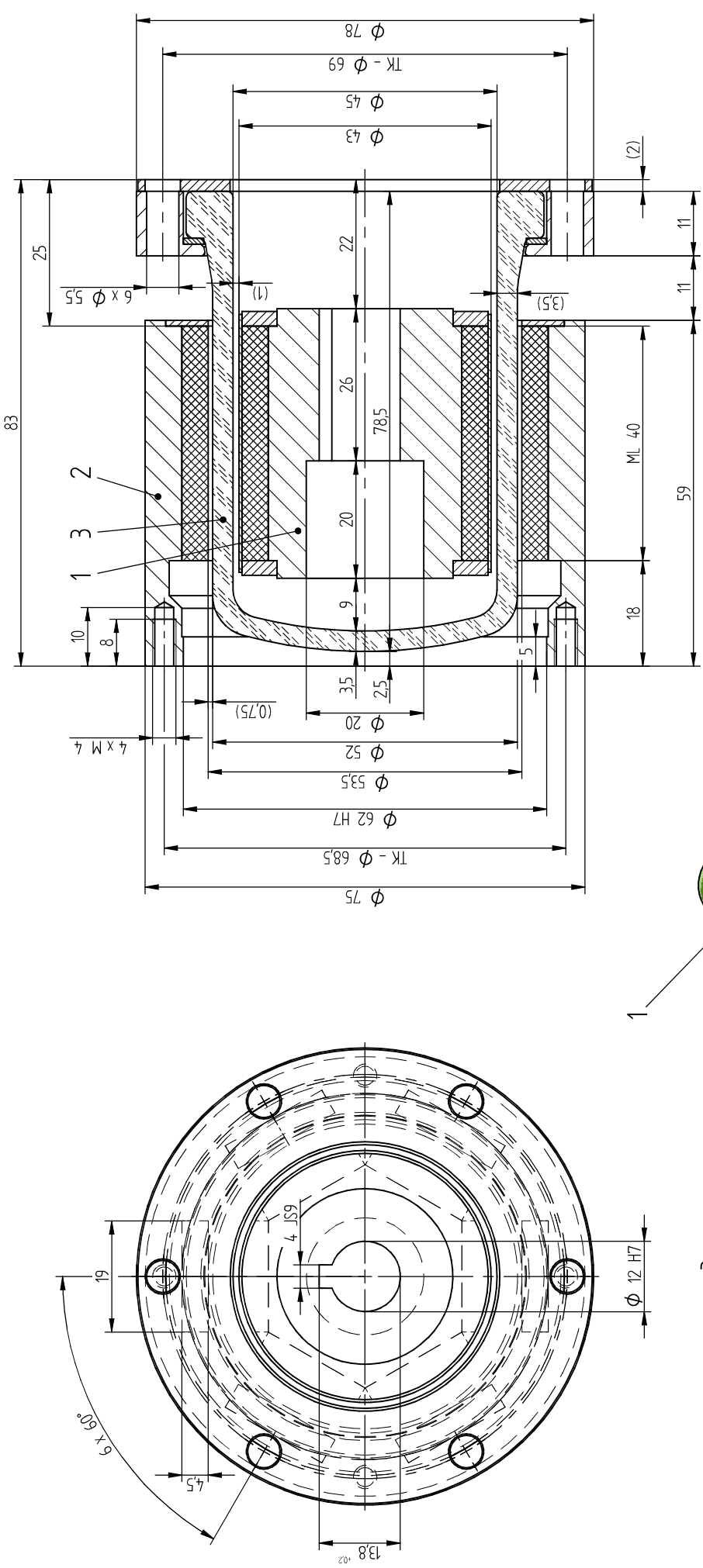
WEB: www.industrialencodersdirect.co.uk

EMAIL: sales@industrialencodersdirect.co.uk

Annexe 7

Accouplement magnétique


- Datasheet
- Linéarisation



PN16

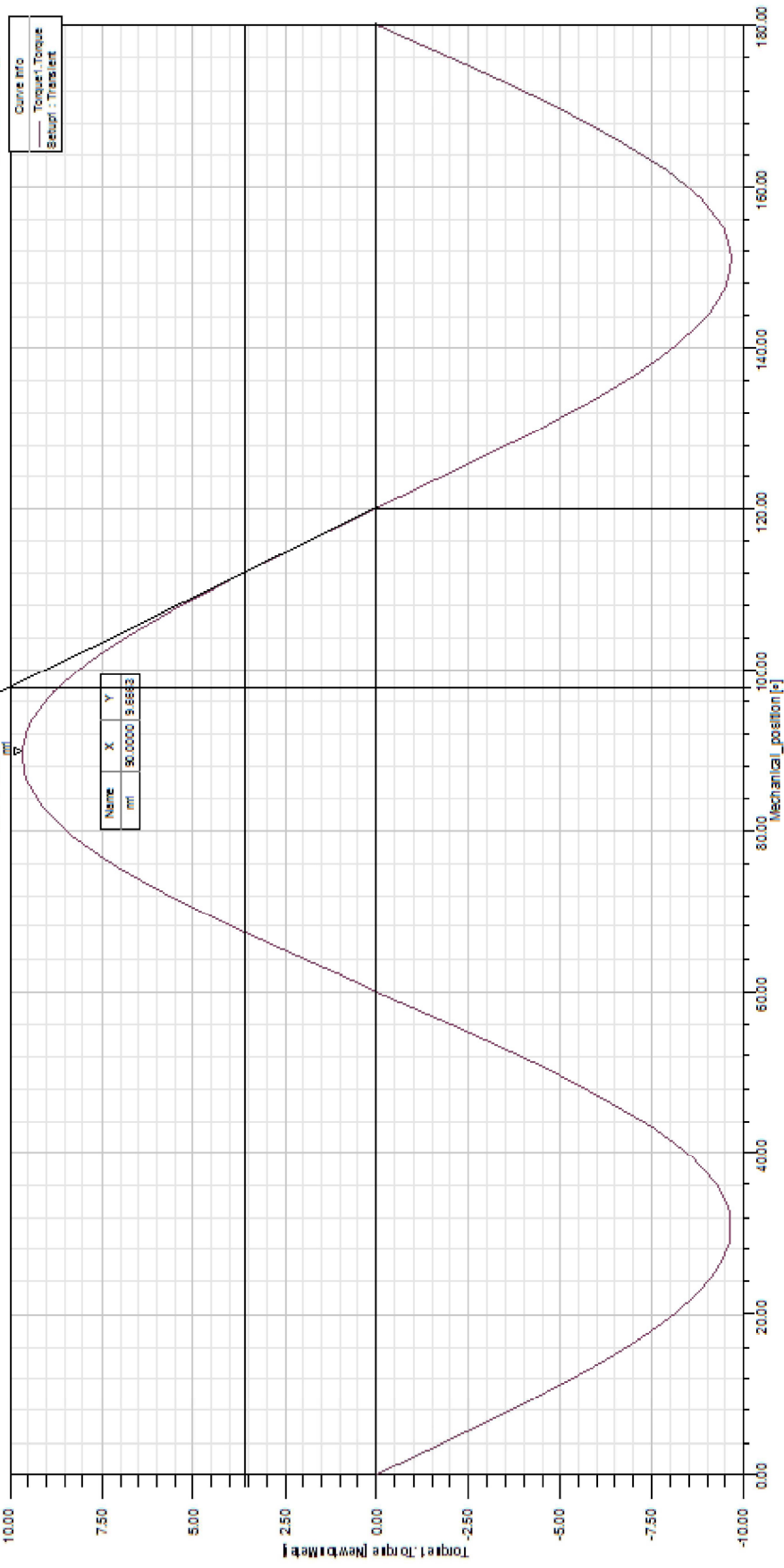
Magnetkupplung: mit BOROHARDCAN® - Spalttopf

NdFeB N45SH Magnete im Innen- und Außenrotor !

3		1	Spalttopf	S00000000164	D056S0005	BOROHARD/CAN®		62 H7	+0.030 0.030		
2		1	Außenrotor	AR0000001196	D056AK021	1.4057 / 1.4571		12 H7	+0.018 0.000		
1		1	Innenrotor	IR0000001264	D056I0025	1.4057 / 1.4571		4 JS9	+0.015 -0.015		
Pos.	Stück	Bezeichnung		Mat.-Nr.	Zeichnungs - Nr.		Werkstoff	Passmaß	Abmaße		
Verwendung für:				110056 - 45-8 GL							
Abweichungen für Maße ohne Toleranzangabe nach DIN ISO 2768				Projektskizzenmethode							
Nennmaßbereich in mm											
Genauigkeitsgrad				C A D							
0,5 - 3				± 0,1		Erstellt: 04.11.2010		Name Simon			
> 3 - 6				± 0,1		Geprüft: 30.01.2012		Hs			
> 6 - 30				± 0,2		Freig: 30.01.2012		Hs			
> 30 - 120				± 0,3		Unübersichtszuwerk gem. DIN 34 für Zeichnung und Bauteile					
> 120 - 400				± 0,5							
> 400 - 1000				± 0,8							
> 1000 - 2000				± 1,2							
Benennung:				Magnetkupplung							
DST - Nr.:				D056M0025							
Ersatz für: *****				MK0000000951							
Ursprung: *****				D056M0025							
Rev.:				00							

32/

XY Plot 4



Annexe 8

Datasheet filtres Schurter 5500

AC Filter Cost Optimized

Standard- or Medical-Filter



Description

- Chassis:
Screw-on mounting, from top
- Line filter in standard and medical version, 1-stage, standard attenuation
- Quick connect terminals 6.3 x 0.8 mm
- Especially effective against asymmetrical interferences in the frequency range from 10kHz up to 30MHz

Approvals

- VDE Certificate Number: 40004673
- UL File Number: E72928

Characteristics

- Compact design
- High attenuation at maximum resp. asymmetric load independent from the line impedance
- Especially designed for industrial applications such as: Frequency Converters, Stepper Motor Drives, UPS-Systems, Inverters
- Suitable for use in equipment according to IEC 60950

Other versions on request

- Version with wire connection

References

Alternative: Standard version

Weblinks

[pdf-datasheet](#), [html-datasheet](#), [General Product Information](#), [Approvals](#), [CE declaration of conformity](#), [RoHS](#), [CHINA-RoHS](#), [Mating Connectors](#), [e-Shop](#), [SCHURTER-Stock-Check](#), [Distributor-Stock-Check](#), [CAD-Drawings](#), [Accessories](#), [Mounting instruction](#), [Detailed request for product](#)

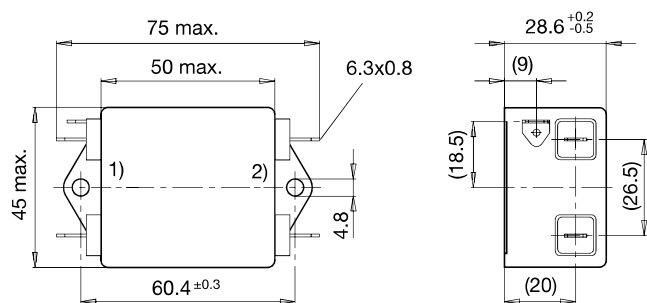
Technical Data

Ratings IEC	6 - 20A @ Ta 40 °C / 250VAC; 50Hz
Ratings UL/CSA	6 - 20A @ Ta 40 °C / 125VAC; 60Hz
Leakage Current	standard < 0.5mA (250V / 60Hz)
Dielectric Strength	1.7kVDC between L-N
	2.7kVDC between L/N-PE Test voltage (2 sec)
Allowable Operation Temp.	-25 °C to 100 °C
Climatic Category	25/100/21 acc. to IEC 60068-1
Protection Class	Suitable for appliances with protection class I acc. to IEC 61140
Terminal	Quick connect terminals 6.3 x 0.8 mm
Material: Housing	Aluminum

Line Filter	Standard and Medical Version, IEC 60939, IEC 60601-1, UL 1283, UL 544, EN 133 200, CSA C22.2 no. 8 Technical Details
MTBF	> 200'000h acc. to MIL-HB-217 F

Dimensions

Case 73



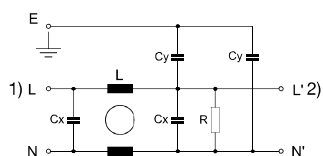
1) Line
2) Load

Diagrams

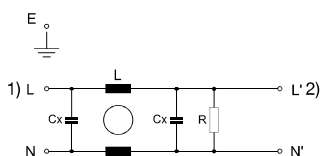
Standard version

Medical version (M5)

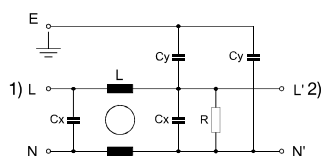
Medical version (M80)



1) Line
2) Load



1) Line
2) Load



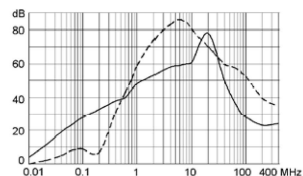
1) Line
2) Load

Attenuation Loss

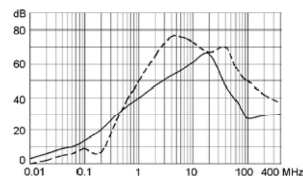
- - - differential mode ____ common mode

Standard version

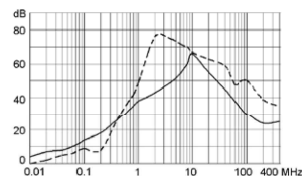
6 A



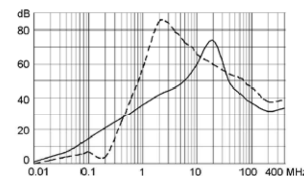
10 A



16 A

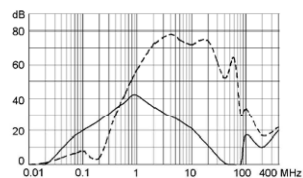


20 A

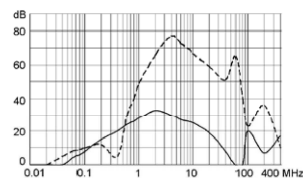


Medical version (M5)

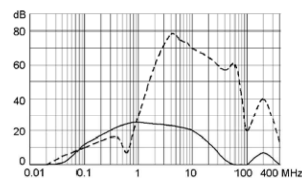
6 A



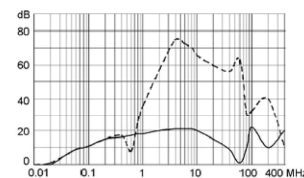
10 A



16 A

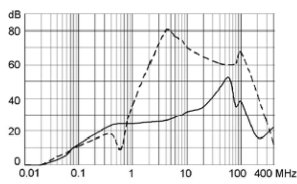


20 A

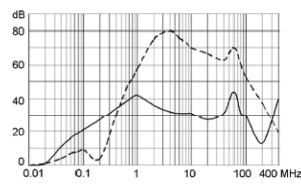


Medical version (M80)

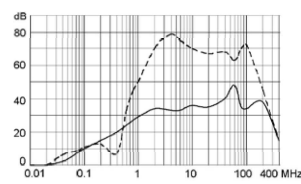
6 A



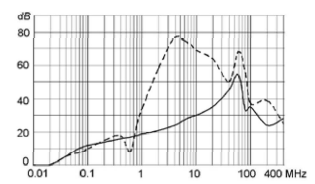
10 A



16 A



20 A



Variants

Rated Current [A]	Filter-Type	L [mH]	Cx (X2) [μF]	Cy (Y2) [nF]	Weight [g]	Housing	R [MΩ]	Order Number
6	Standard Version	2 x 1.8	0.1	4.7	-	73	1	5500.2031
10	Standard Version	2 x 0.82	0.1	4.7	-	73	1	5500.2032
16	Standard Version	2 x 0.64	0.1	4.7	-	73	1	5500.2033
20	Standard Version	2 x 0.5	0.1	4.7	-	73	1	5500.2034
6	Medical Version (M5)	2 x 1.8	0.1	-	-	73	1	5500.2072
10	Medical Version (M5)	2 x 0.82	0.1	-	-	73	1	5500.2073
16	Medical Version (M5)	2 x 0.64	0.1	-	-	73	1	5500.2074
20	Medical Version (M5)	2 x 0.5	0.1	-	-	73	1	5500.2076
6	Medical Version (M80)	2 x 1.8	0.1	0.47	-	73	1	5500.2086
10	Medical Version (M80)	2 x 0.82	0.1	0.47	-	73	1	5500.2087
16	Medical Version (M80)	2 x 0.64	0.1	0.47	-	73	1	5500.2075
20	Medical Version (M80)	2 x 0.5	0.1	0.47	-	73	1	5500.2088

Packaging unit

10 Pcs

Annexe 9

Datasheet filtres Schaffner Common
mode Chokes RD séries

Current-compensated Chokes



- | Rated currents from 6 to 64 A
- | Up to 600 VAC or 850 VDC
- | DC to 400 Hz frequencies
- | Dual, triple and quad-choke configurations



Approvals

RoHS

RD chokes are attenuating common-mode or asymmetric (P/N → E) interference signals, by being connected in series with the phase and neutral lines of an AC powerline input. Symmetrical components of the noise are also attenuated by the leakage inductance of the windings. These chokes are typically used in conjunction with suppression capacitors.

Features and benefits

- | High saturation resistance and excellent thermal behavior.
- | Through hole or wire connections.
- | Dual, triple and quad-choke configuration.
- | Up to 64 A quad configuration.
- | Multiple housing options
- | Custom-specific versions are available on request.

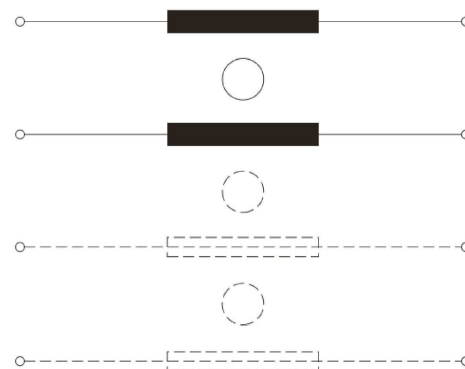
Typical applications

- | Phase-angle control circuits in combination with saturating chokes
- | EMI input filters
- | For suppressing equipment with no earth connection
- | Suppressing high interference levels

Technical specifications

Maximum continuous operating voltage	600 VAC/850 VDC @ 40 °C
Operating frequency	dc to 400 Hz
Rated currents	6 to 64 A @ 40 °C max.
High potential test voltage winding-to-winding	2500 V, 50 Hz, 2 sec, factory test 2500 VAC, 60 sec, guaranteed
winding-to-housing	4000 VAC, 60 sec, guaranteed
Surge current @ 10msec	20 x I _{nominal} @ 25 °C
Temperature range (operation and storage)	-25 °C to +110 °C (25/110/21)
Flammability corresponding to MTBF @ 40°C/230V (Mil-HB-217F)	UL 94 V-0 (insulation tubes UL 94 V-2) > 5,000,000 hours

Typical electrical schematic



Choke selection table

Choke	Nominal current @ 40 °C [A]	Inductance L [mH/path]	Resistance R [m Ω/path]	Choke configuration [Qty]	Input/Output connections	Pin footprint connections [mm]	Weight [g]
RD 5122-6-9m6	6	9.6	52.55	2	-02	Ø 1	160
RD 5122-10-6m0	10	6	24.25	2	-02	Ø 1.3	160
RD 5122-16-2m0	16	2	9.5	2	-02	Ø 1.6	160
RD 5132-6-5m0	6	5	38	3	-02	Ø 1	160
RD 5132-10-3m0	10	3	17.6	3	-02	Ø 1.3	160
RD 5132-16-1m0	16	1	6.9	3	-02	Ø 1.6	160
RD 6127-6-15m0	6	15	66.65	2	-07	Ø 1	235
RD 6127-10-9m0	10	9	25.9	2	-07	Ø 1.5	235
RD 6127-16-3m0	16	3	10.9	2	-07	Ø 1.8	235
RD 6137-6-7m5	6	7.5	49	3	-07	Ø 1	235
RD 6137-10-4m5	10	4.5	18.35	3	-07	Ø 1.5	235
RD 6137-16-1m5	16	1.5	8.3	3	-07	Ø 1.8	235
RD 7127-6-25m0	6	25	84.2	2	-07	Ø 1	320
RD 7127-10-14m0	10	14	33.5	2	-07	Ø 1.4	350
RD 7127-16-5m7	16	5.7	14.1	2	-07	Ø 1.8	370
RD 7127-25-2m8	25	2.8	6.4	2	-07	Ø 2.4	400
RD 7127-36-1m0	36	1	3.3	2	-07	Ø 2.7	380
RD 7137-6-12m0	6	12	60.6	3	-07	Ø 1	340
RD 7137-10-6m6	10	6.6	21.9	3	-07	Ø 1.5	380
RD 7137-16-2m8	16	2.8	10.7	3	-07	Ø 1.8	380
RD 7137-25-1m3	25	1.3	4.45	3	-07	Ø 2.5	440
RD 7137-36-0m5	36	0.5	2.75	3	-07	Ø 2.7	400
RD 7147-6-6m0	6	6	45.1	4	-07	Ø 1	320
RD 7147-10-3m5	10	3.5	19.1	4	-07	Ø 1.4	370
RD 7147-16-1m5	16	1.5	8.5	4	-07	Ø 1.8	390
RD 7147-25-0m7	25	0.7	3.65	4	-07	Ø 2.4	430
RD 7147-36-0m2	36	0.2	2.3	4	-07	Ø 2.5	400
RD 8127-16-12m0	16	12	20.05	2	-07	Ø 2	590
RD 8127-25-5m0	25	5	8.45	2	-07	Ø 2.4	630
RD 8127-36-3m0	36	3	4.55	2	-07	1.5 x 4.5	690
RD 8127-50-1m0	50	1	2.5	2	-07	1.7 x 5	640
RD 8127-64-0m8	64	0.8	1.6	2	-07	2.5 x 5	710
RD 8137-16-5m0	16	5	11.6	3	-07	Ø 2	630
RD 8137-25-2m5	25	2.5	6.4	3	-07	Ø 2.4	650
RD 8137-36-1m5	36	1.5	3.65	3	-07	1.5 x 4.5	720
RD 8137 50 0m6	50	0.6	2.15	3	-07	1.7 x 5	700
RD 8137-64-0m5	64	0.5	1.35	3	-07	2.5 x 5	780
RD 8147-16-3m0	16	3	9.25	4	-07	Ø 2	650
RD 8147-25-1m3	25	1.3	5.05	4	-07	Ø 2.4	650
RD 8147-36-0m8	36	0.8	3	4	-07	1.5 x 4.5	760
RD 8147-50-0m3	50	0.3	1.75	4	-07	1.7 x 5	740
RD 8147-64-0m2	64	0.2	1.1	4	-07	2.5 x 5	820

Test conditions:

Measuring frequency: 1 kHz; 500 µA > 0.16 mH > 1.6 mH; 50 µA > 1.6 mH < 160 mH

Inductance tolerance: +50%, -30%

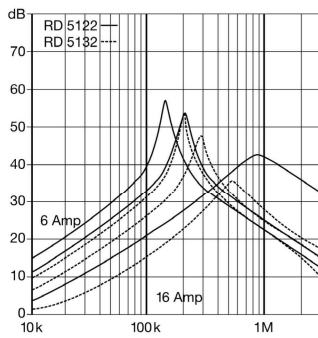
Resistance tolerance: ±15% @ 25 °C

Electrical characteristics @ 25 °C: ±2 °C

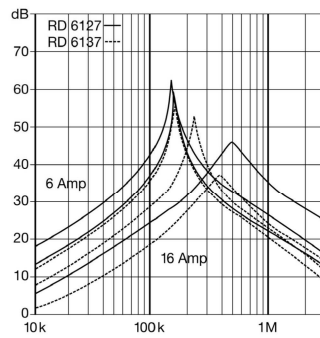
Typical choke attenuation/resonance frequency characteristics

Per CISPR 17; 50 Ω /50 Ω asym

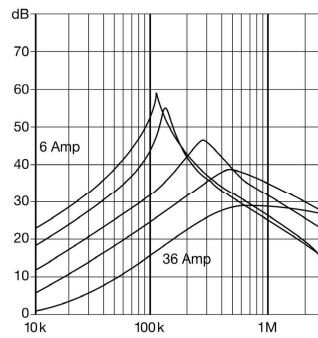
RD 51x2



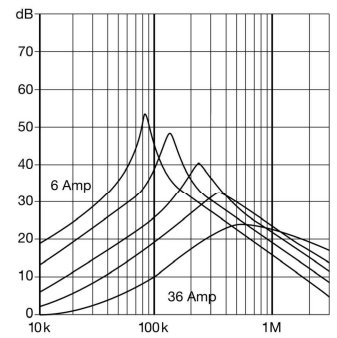
RD 61x7



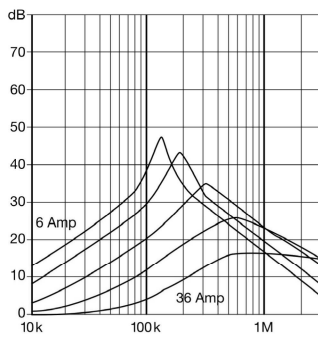
RD 7127



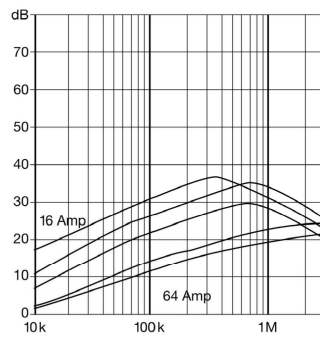
RD 7137



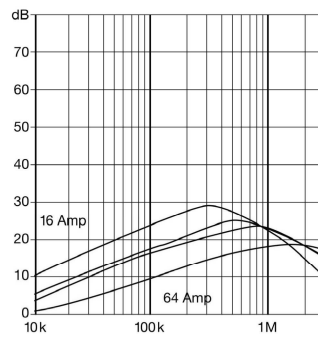
RD 7147



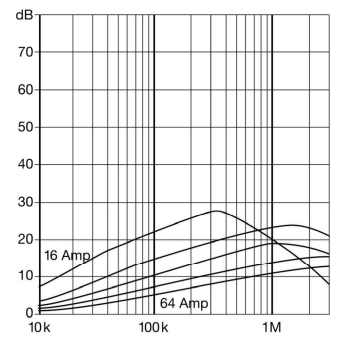
RD 8127



RD 8137



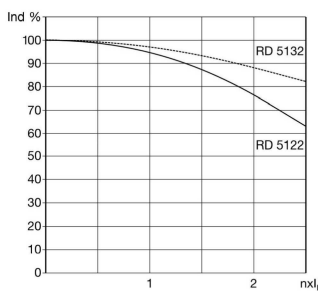
RD 8147



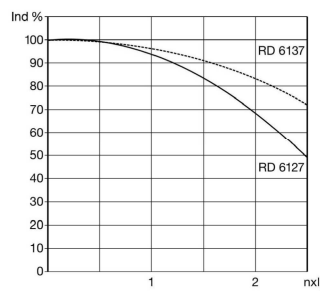
Typical saturation characteristics

Inductance (typical value in %) vs. nominal current (A DC)

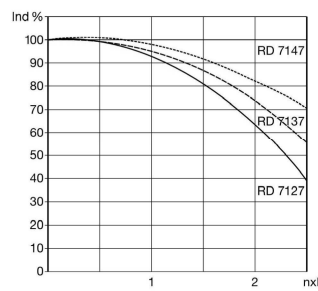
RD 51x2



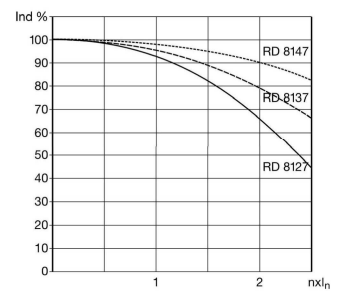
RD 61x7



RD 71x7

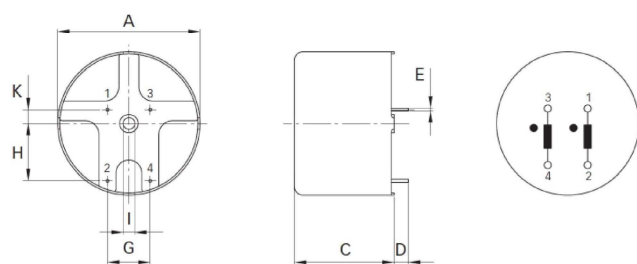


RD 81x7

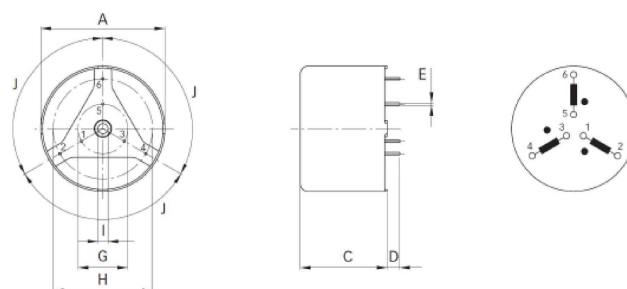


Mechanical data

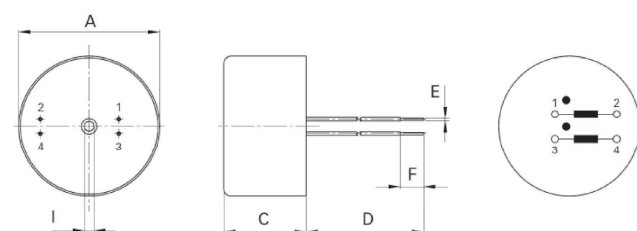
RD 5122



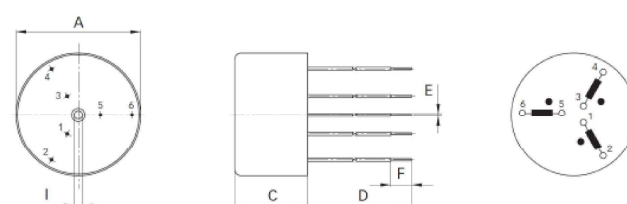
RD 5132



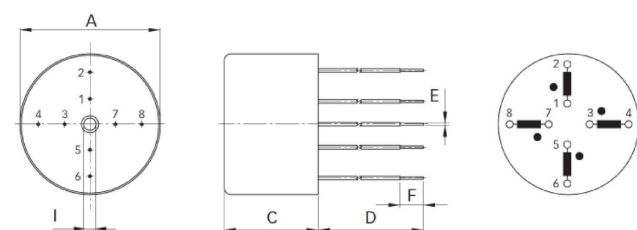
RD 6127, RD 7127, RD 8127



RD 6137, RD 7137, RD 8137



RD 7147, RD 8147



Dimensions

	RD 5122	RD 5132	RD 6127	RD 6137	RD 7127	RD 7137	RD 7147	RD 8127	RD 8137	RD 8147	Tolerances
A	50	50	60	60	70	70	70	80	80	80	±0.5
C	35	35	35	35	40	40	40	50	50	50	±0.5
D	5 ±0.5	5 ±0.5	150	150	150	150	150	200	200	200	+5/-0
E											see choke selection table
F			10	10	10	10	10	20	20	20	±1
G	15	20									±0.3
H	20	40 ±0.4									±0.3
I	4.1 +3/-0	4.1 +3/-0	4.1 +3/-0	4.1 +3/-0	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	+6/-0
J		120°									
K	5										

All dimensions in mm; 1 inch = 25.4 mm

Tolerances according: ISO 2768-m / EN 22768-m

Please visit www.schaffner.com to find more details on filter connectors.



Headquarters, global innovation and development center

Switzerland

Schaffner Group

Nordstrasse 11
4542 Luterbach
T +41 32 6816 626
F +41 32 6816 630
info@schaffner.com
<http://www.schaffner.com>



Sales and application centers

China

Schaffner EMC Ltd. Shanghai

T20-3, No 565 Chuangye Road
Pudong New Area
201201 Shanghai
T +86 21 3813 9500
F +86 21 3813 9501 / 02
cschina@schaffner.com
<http://www.schaffner.com.cn/>

Finland

Schaffner Oy

Sauvonrinne 19 H
08500 Lohja
T +358 19 35 72 71
finlandsales@schaffner.com

France

Schaffner EMC S.A.S.

112 Quai de Bezons
Boite postale 133
95100 Argenteuil
T +33 1 34 34 30 60
F +33 1 39 47 02 28
francesales@schaffner.com

Germany

Schaffner Deutschland GmbH

Schoemperlenstrasse 12B
76185 Karlsruhe
T +49 721 56910
F +49 721 569110
germanysales@schaffner.com

Italy

Schaffner EMC S.r.l.

Via Galileo Galilei 47
20092 Cinisello Balsamo (MI)
T +39 02 66 04 30 45 / 47
F +39 02 61 23 943
italysales@schaffner.com

Japan

Schaffner EMC K.K.

1-32-12, Kamiyama, Setagaya-ku
7F Mitsui-seimei Sangenjaya Bldg.
154-0011 Tokyo
T +81 3 5712 3650
F +81 3 5712 3651
japansales@schaffner.com
<http://www.schaffner.jp>

Singapore

Schaffner EMC Pte Ltd.

Blk 3015A Ubi Road 1
05-09 Kampong Ubi Industrial Estate
408705 Singapore
T +65 6377 3283
F +65 6377 3281
singaporesales@schaffner.com

Spain

Schaffner EMC España

Calle Caléndula 93, Miniparc III, Edificio E,
Alcobendas
Miniparc III, Edificio E
El Soto de la Moraleja
Alcobendas
28109 Madrid
M +34 618 176 133
T +34 917 912 900
F +34 917 912 901
spainsales@schaffner.com

Sweden

Schaffner EMC AB

Turebergstorg 1, 6
19147 Sollentuna
T +46 8 5792 1121 / 22
F +46 8 92 96 90
swedensales@schaffner.com

Switzerland

Schaffner EMV AG

Nordstrasse 11
4542 Luterbach
T +41 32 681 66 26
F +41 32 681 66 41
switzerlandsales@schaffner.com

Taiwan R.O.C.

Schaffner EMV Ltd.

6 Floor, No. 413
Rui Guang Road
114 Nei Hu District Taipei City
T +886 2 87525050
F +886 2 87518086
taiwansales@schaffner.com

Thailand

Schaffner EMC Co. Ltd.

Northern Region Industrial Estate
67 Moo 4 Tambon Ban Klang
Amphur Muang P.O. Box 14
51000 Lamphun
T +66 53 58 11 04
F +66 53 58 10 19
thailandsales@schaffner.com

UK

Schaffner Ltd.

5 Ashville Way
Molly Millars Lane
Wokingham
RG41 2PL Berkshire
T +44 118 9770070
F +44 118 9792969
uksales@schaffner.com
<http://www.schaffner.uk.com>

USA

Schaffner EMC Inc.

52 Mayfield Avenue
08837 Edison, New Jersey
T +1 800 367 5566
T +1 732 225 9533
F +1 732 225 4789
usasales@schaffner.com
<http://www.schaffner.com/us>

Schaffner MTC LLC

6722 Thirlane Road
24019 Roanoke, Virginia
T +1 276 228 7943
F +1 276 228 7953
<http://www.schaffner-mtc.com>

Schaffner Trencos LLC

2550 Brookpark Road
44134 Cleveland, Ohio
T +1 216 741 5282
F +1 216 741 4860
<http://schaffner-trencos.com>

To find your local partner within Schaffner's global network: www.schaffner.com

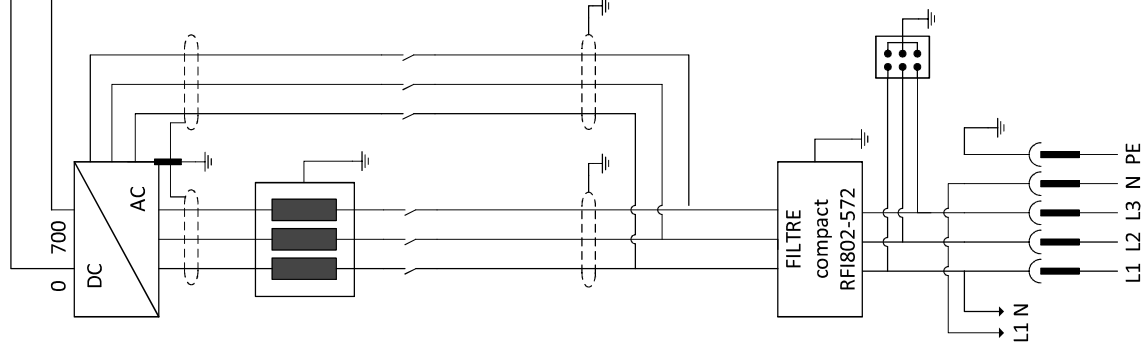
© 2015 Schaffner Group

The content of this document has been carefully checked and understood. However, neither Schaffner nor its subsidiaries assume any liability whatsoever for any errors or inaccuracies of this document and the consequences thereof. Published specifications are subject to change without notice. Product suitability for any area of application must ultimately be determined by the customer. In all cases, products must never be operated outside their published specifications. Schaffner does not guarantee the availability of all published products. This disclaimer shall be governed by substantive Swiss law and resulting disputes shall be settled by the courts at the place of business of Schaffner Holding AG. Latest publications and a complete disclaimer can be downloaded from the Schaffner website. All trademarks recognized.

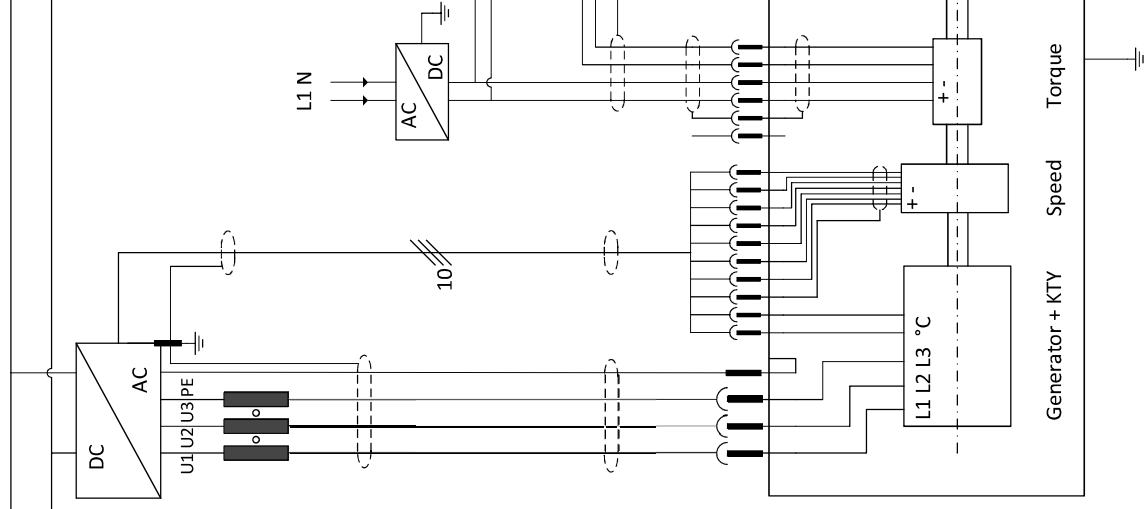
Annexe 10

Schéma détaillé de la micro-turbine

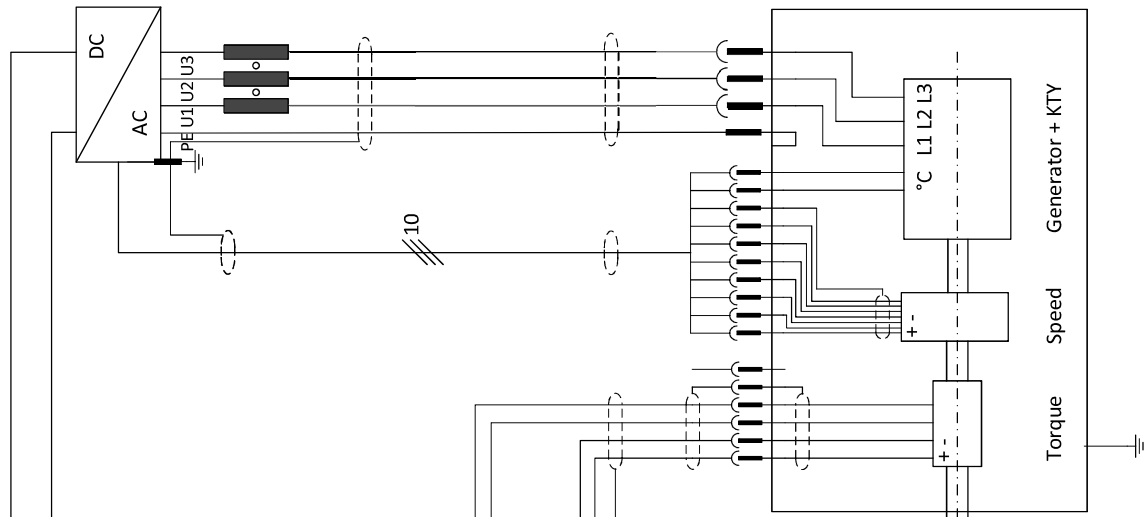
EMERSON
UNIDRIVE
SP
1406



EMERSON
UNIDRIVE
SP
1403

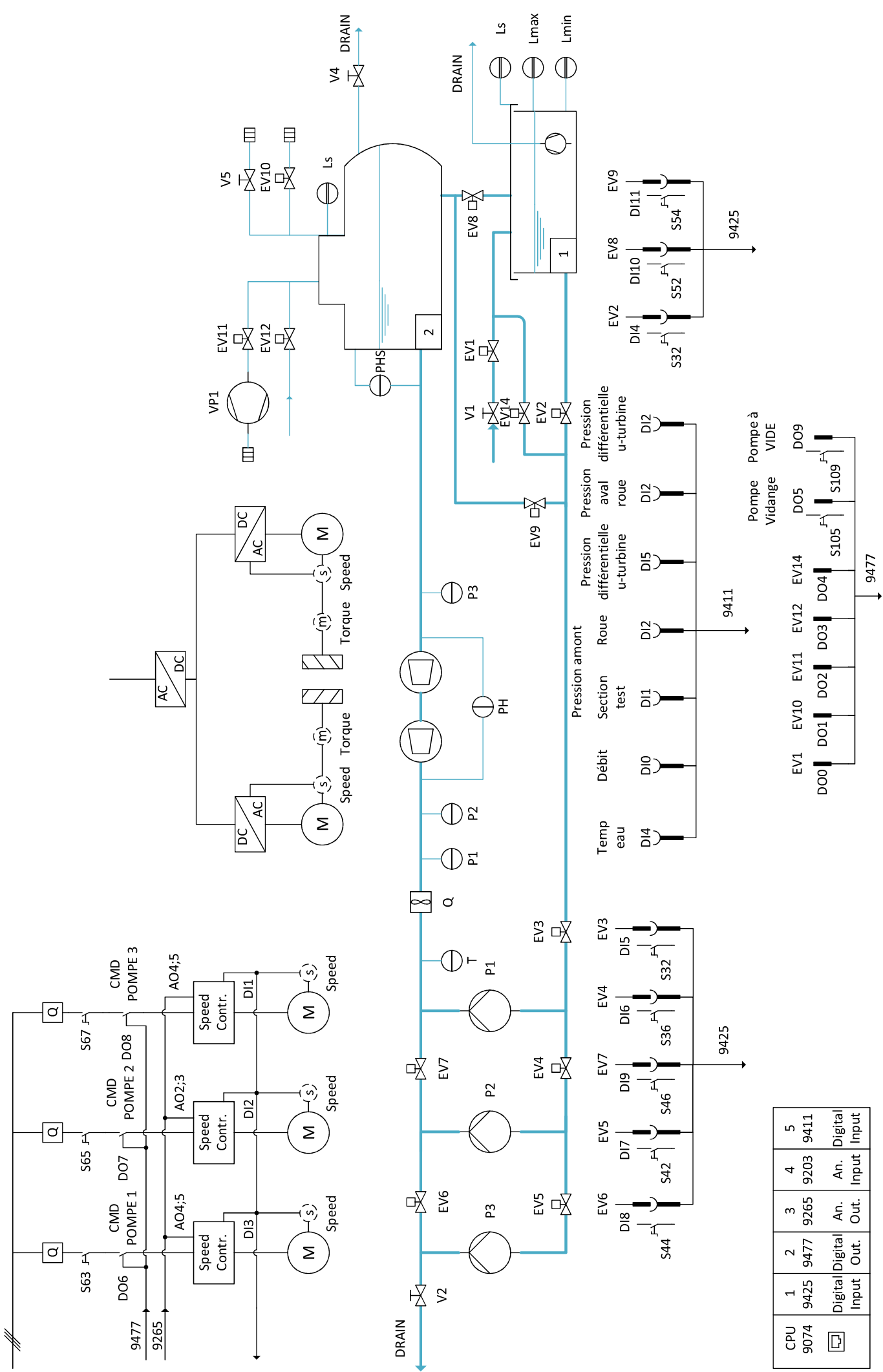


EMERSON
UNIDRIVE
SP
1403



Annexe 11

Schéma global du banc de test
hydraulique



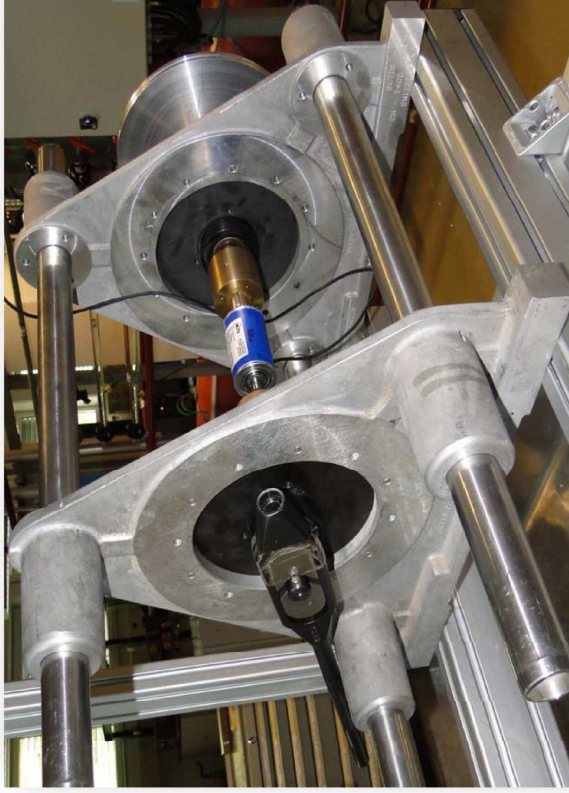
CPU	9074	1	2	3	4	5
		9425	9477	9265	9203	9411
		Digital	Digital	An.	An.	Digital
		Input	Out.	Out.	Input	Input

Annexe 12

Calibration des couplemètres

- SN : B11211272587
- SN : B11503043398

Torque Sensors Calibration



Content

[Calibration table](#)

Torque transducers

NCTE 2200-7.5

Acquisition system

NI-cDAQ 9174

Power supply

EA-PS 2032-050

Go

Go

Go

Go

Author: Vlad Hasmatuchi

Created: 28.10.2013

Updated: 28.05.2015



T = Slope * Data + Intercept

No.	Manufacturer	Type	SN	Output	Range	Slope	Intercept	Calibration	Comment
1	NCTE	Absolute	B11211272586	0-10 V	-7.5 ÷ 7.5 [Nm]	4.6229	-10.547		T_out
2	NCTE	Absolute	B11211272587	0-10 V	-7.5 ÷ 7.5 [Nm]	5.4397	-1.7806	GD	T_in - damaged 07.05.2015, recalibrated 28.05.2015
3	NCTE	Absolute	B11503043398	0-10 V	-7.5 ÷ 7.5 [Nm]	3.7056	-0.0233		T_in - new

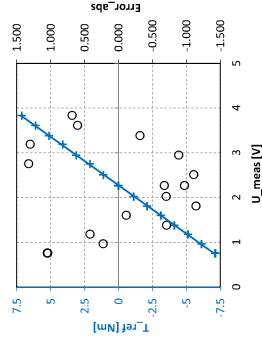
Author: Vlad Hasmatuchi
Created: 28.10.2013
Updated: 28.05.2015

NCTE 2200-7.5

Manufacturer: NCTE
Type: 2200-7.5
SN: 811211272586
Range: T_{abs} = -7.5 ÷ 7.5 [Nm]
Formula: T_{abs} = a * U_{meas} + b
Slope (a): 4.6229
Intercept (b): -10.547

No.	T_ref [Nm]	U_mean [V]	Error_abs [%]	Error_rel [%]
1	-7.126983	0.755881	1.04315	-1.04315
2	-6.104698	0.964486	0.23040	-0.26898
3	-4.104142	1.38279	-0.70658	1.22701
4	-2.103585	1.808899	-1.13731	3.85322
5	0	2.266515	-0.96994	#DIV/0!
6	-1.125313	2.02772	-0.68891	4.42644
7	-3.12587	1.603614	-0.10920	0.48898
8	-5.126426	1.179033	0.04262	-0.58477
9	-7.126983	0.756001	1.05094	-1.05094
10	0	2.271127	-0.67079	#DIV/0!
11	1.125313	2.507867	-1.10418	-6.99313
12	3.12587	2.940058	-0.80094	-2.00854
13	5.126426	3.385556	-0.31344	-0.43576
14	7.126983	3.833729	0.68701	0.68701
15	6.104698	3.611363	0.60716	0.70883
16	4.104142	3.189297	1.30012	2.25770
17	2.103585	2.756941	1.32563	4.49126
T_ref_max [Nm] 7.126983				

NCTE 2200-7.5



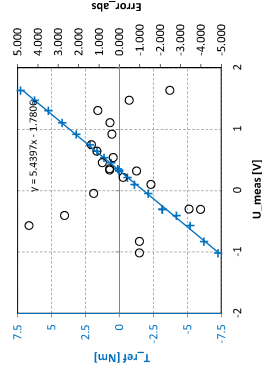
HaV, GaS - 25.10.2013

Home

Manufacturer: NCTE
Type: 2200-7.5
SN: 811211272587
Range: T_{abs} = -7.5 ÷ 7.5 [Nm]
Formula: T_{abs} = a * U_{meas} + b
Slope (a): 5.4397
Intercept (b): -1.7806

No.	T_ref [Nm]	U_mean [V]	Error_abs [%]	Error_rel [%]
1	0	0.333817	0.48553	#DIV/0!
2	0.102028	0.352463	0.47728	33.97595
3	1.121312	0.337504	0.30220	1.95740
4	3.175884	0.916152	0.37323	0.85356
5	5.225454	1.302064	1.05718	1.46941
6	7.263021	1.629521	-2.47164	-2.47164
7	6.239736	1.468003	-0.47969	-0.5836
8	4.201169	1.105786	0.49592	0.78442
9	2.154599	0.741775	1.37456	4.63355
10	1.627453	0.641287	1.10637	4.93752
11	0.608169	0.450366	0.84107	10.04440
12	-0.608169	0.213181	-0.17710	2.10309
13	-2.142596	-0.049651	1.26544	-4.89663
14	-4.201169	-0.409	2.69491	-4.65898
15	-6.239736	-0.832775	-0.97632	1.13643
16	-7.263021	-1.020945	-0.98049	0.98049
17	-5.225454	-0.574121	4.43077	-6.15847
18	-3.167881	-0.308207	-3.98281	9.13142
19	-3.167881	-0.300635	-3.41570	7.83120
20	-1.121312	0.100442	-1.55464	10.06978
21	0	0.316058	-0.84454	#DIV/0!
T_ref_max [Nm] 7.263021				

NCTE 2200-7.5

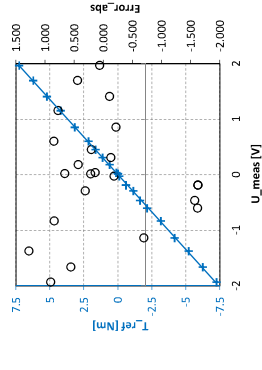


HaV, GrM - 28.05.2015

Manufacturer: NCTE
Type: 2200-7.5
SN: 811503043398
Range: T_{abs} = -7.5 ÷ 7.5 [Nm]
Formula: T_{abs} = a * U_{meas} + b
Slope (a): 3.7056
Intercept (b): -0.0233

No.	T_ref [Nm]	U_mean [V]	Error_abs [%]	Error_rel [%]
1	0	0.010579	0.21906	#DIV/0!
2	0.103029	0.036938	0.14532	10.23833
3	1.124313	0.307274	-0.12369	-0.79857
4	3.169882	0.85758	-0.21123	-0.48373
5	5.209449	1.410046	-0.10583	-0.14747
6	7.25902	1.965568	0.06880	0.06880
7	6.232734	1.69698	0.44490	0.51815
8	4.195167	1.153707	0.78123	1.35179
9	2.149598	0.603121	0.85448	2.88552
10	1.629453	0.450086	0.20782	0.92581
11	0.608169	0.178949	0.43593	5.20323
12	0	0.019334	0.66599	#DIV/0!
13	-0.103029	-0.0251	-0.18297	12.89109
14	-1.128314	-0.292095	0.31171	-2.00536
15	-3.169882	-0.832571	0.84594	-1.93720
16	-5.209449	-1.374448	1.28109	-1.78511
17	-7.25902	-1.934896	0.90604	-0.90604
18	-6.235735	-1.655473	0.56286	-0.65523
19	-4.184164	-1.136387	-0.69061	1.19813
20	-2.148598	-0.605135	-1.61303	5.44961
21	-1.633454	-0.465197	-1.56605	6.95949
22	-0.608169	-0.189563	-1.61972	19.33273
23	-0.608169	-0.189524	-1.61773	19.30896
T_ref_max [Nm] 7.25902				

NCTE 2200-7.5



HaV, GrM - 18.05.2015